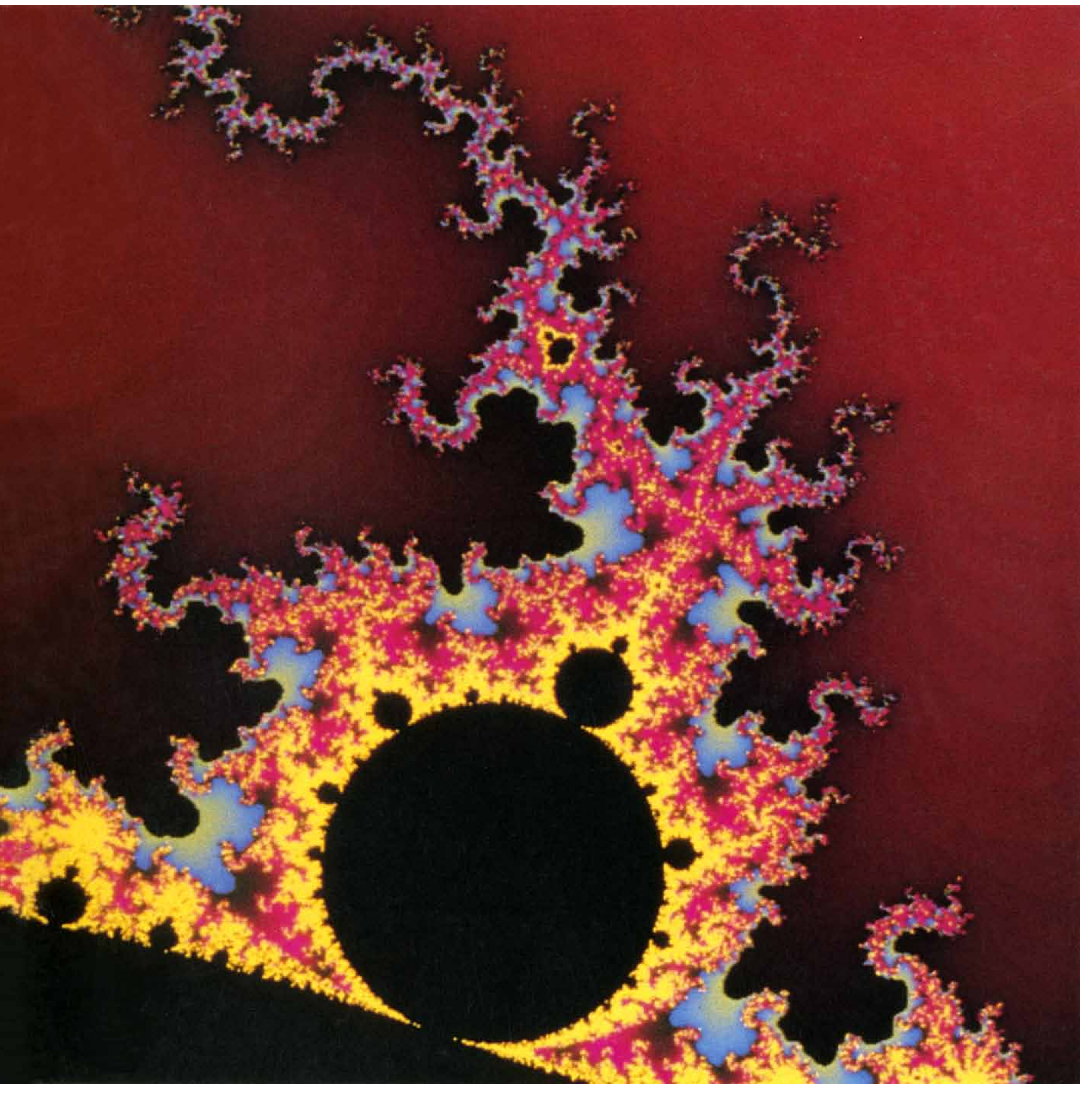
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



EXPLORACION DEL CONJUNTO DE MANDELBROT

Octubre 1985

400 PTAS.

Copyright © 1985 Prensa Científica S.A.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 109
Octubre 1985

INVESTIGACION Y CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

SCIENTIFIC AMERICAN

COMITE DE REDACCION Jonathan Piel (Presidente y director), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, Peter G. Brown, Ari W. Epstein, Michael Feirtag, Robert Kunzig, Philip Morrison, James T. Rogers, Armand Schwab, Jr., Joseph Wisnovsky

DIRECCION ARTISTICA Samuel L. Howard
PRODUCCION Richard Sasso
DIRECTOR GENERAL George S. Conn

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACCION José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
Carlos Oppenheimer
José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Alfredo Carrato Ibáñez: *La célula suprarrenal cromafín;* Rodolfo Miranda Soriano: *El microscopio de efecto túnel;* Juan-Pedro Acordagoicoechea: *El vacío clásico;* Jaime Truyols Santonja: *Los vertebrados mesozoicos de Tailandia;* Manuel Puigcerver: *Restos jóvenes de supernova;* José Miguel Calvo Hernández y Juan Vilchez Bartolomé: *El hielo antártico;* Donato Franco Carrera: *Ingeniería de la mariposa;* Luis Bou: *Juegos de ordenador;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Arturo Baró, Nicolás García, Rodolfo Miranda y Ramón Pascual

Libros:

Luis Mas, Luis Alonso, Rafael L. Felip, Carlos Pérez, Juan León y Antonio Domínguez Ortíz



LA PORTADA

La fotografía de la portada es una ampliación, generada por ordenador, de una porción de la frontera del conjunto de Mandelbrot, construcción matemática que ha sido llamada "el objeto más complicado de las matemáticas". (Véase "Juegos de ordenador", por A.K. Dewdney, en este mismo número.) Benoit B. Mandelbrot, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de la IBM, fue el primero en investigar sus propiedades. Los elementos del conjunto son números complejos. Los puntos pertenecientes al conjunto se muestran en negro; las regiones coloreadas representan puntos que huyen de la frontera del conjunto. La ampliación aquí mostrada corresponde a la región encuadrada en blanco y rotulada *g* en la primera ilustración de "Juegos de ordenador". Esta fotografía, lo mismo que las otras que acompañan este mes esa sección, la tomaron, en el Graphiklabor Dinamische Systeme, Heinz-Otto Peitgen, Peter H. Richter y Dietmar Saupe, de la Universidad de Bremen. Copyright MAPART.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 4400 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
400 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
500 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034 Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado
por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada portesía Graphiklabor Dynamische Systeme

Página	Fuente
10	Cortesía del Naval Research Laboratory
12	Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., Sacramento Peak Observatory (*arriba*); Magda Mària, E. Priest y E. Smith (*abajo*)
13	Magda Mària, M. Kuperus y E. Tandberg-Hanssen (*arriba*); Magda Mària, Milne, E. Priest y Roberts (*abajo*)
14	Instituto de Astrofísica de Canarias
15	High Altitude Observatory National Center for Atmospheric Research, patrocinado por la National Science Foundation
16	Magda Mària J. M. Malherbe y E. Priest
17	Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. Sacramento Peak Observatory (*derecha*); High Altitude Observatory (*izquierda*)
19	Wolfgang Schmidt
20	Biblioteca Médica Mayo
21	Rex E. Coupland
22	Bunji Tagawa (*arriba*) Reiner Fischer-Colbrie (*abajo*)
23-24	Bunji Tagawa
25	Ruth E. Siegel (*arriba*) Richard Ornberg and Richard D. Leapman (*abajo*)
26	Odile Grynszpan-Winograd (*izquierda*), Wolfgang Schmidt (*derecha*)
28	Alexandra Patzak
31	Gerd Binnig y Heinrich Rohrer
32	Gerd Binnig y Heinrich Rohrer (*arriba*), Ian Worpole (*abajo*)
33	Ian Worpole
34	Gerd Binnig y Heinrich Rohrer
35	Gerd Binnig y Heinrich Rohrer (*arriba*), Ian Worpole (*abajo*)
36	Heinrich Rohrer
39	Arturo Baró, Nicolás García y Rodolfo Miranda
42-43	Colección Granger
44-50	Gabor Kiss
52-59	Patricia J. Wynne
60	Eric Buffetaut y Rucha Ingavat
63	Colección Mendillo de Publicaciones Astronómicas
64	David Green y Steven Gull
65	Frederick D. Seward, Paul Gorenstein y Wallace H. Tucker
66-69	Hank Iken, Walken Graphics
70	Frederick D. Seward, Paul Gorenstein y Wallace H. Tucker
73	Servicio Geológico de los Estados Unidos
74-75	Andrew Tomko
76	David J. Drewry
77	Gordon de Q. Robin, David J. Drewry y D. T. Meldrum
78	Andrew Tomko
80	Claude Lourius, Unversidad de Grenoble
83	Enid Kotschnig
84-86	Tom Prentiss
87	Enid Kotschnig
88-90	Tom Prentiss
93-96	Heinz-Otto Peitgen, Peter H. Richter y Dietmar Saupe
97	John H. Hubbard
100-104	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Copyright © 1985 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York. N. Y. 10017.

Copyright © 1985 Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista.

El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo distintivo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

Los autores

J. L. BALLESTER y J. KLĚCZEK ("Protuberancias solares") han trabajado juntos sobre el tema del artículo mientras el primero realizaba la tesis doctoral en física bajo la dirección del segundo. Klěczek es investigador principal del Instituto astronómico de Ondrejov, de la Academia de Ciencias de Checoslovaquia. Da clases también en la Universidad Carolina de Praga, y ha sido profesor visitante en la Unión Soviética, Holanda y Estados Unidos, entre otros países. Ballester divide sus tareas docentes entre la Escuela Universitaria de Palma de Mallorca, de la que es catedrático, y el departamento de física de la Tierra y del Cosmos de la Universidad balear.

STEPHEN W. CARMICHAEL Y HANS WINKLER ("La célula suprarrenal cromafín") comenzaron su colaboración intercontinental en 1979, cuando el primero pasó en Innsbruck un año sabático. Carmichael es consultor de anatomía de la Clínica Mayo y profesor asociado de la Facultad de Medicina Mayo, donde imparte anatomía macroscópica, citología, histología y embriología a estudiantes y residentes. Licenciado en 1967 por el Kenyon College, se doctoró en anatomía por la Universidad Tulane en 1971. Winkler dirige el departamento de farmacología de la Universidad de Innsbruck, por la que se doctoró en medicina en 1963. Título que le concedió también la Universidad de Oxford, en 1968, por su trabajo en el laboratorio de Hermann Blaschko. Nombrado catedrático de farmacología de Innsbruck en 1975, fue decano de la Facultad de Medicina desde 1977 hasta 1979.

GERD BINNIG y HEINRICH ROHRER ("El microscopio de efecto túnel") pertenecen al Laboratorio de Investigación IBM de Zürich. Binnig se incorporó a esa empresa tras doctorarse por la Universidad de Frankfurt, en 1978. Ha trabajado en la física de bajas temperaturas y en el microscopio de efecto túnel. Se interesa asimismo por la química de superficies y la electroquímica. Rohrer se doctoró por el Instituto Politécnico Federal suizo en 1960. Tras dos años de trabajo en la Universidad de Rutgers, donde se especializó en conductividad térmica, ingresó en la empresa IBM. A Rohrer le atrae también la magnetorresistencia y los fenómenos críticos de ciertos materiales magnéticos.

TIMOTHY H. BOYER ("El vacío clásico") enseña física en el City College de la Universidad estatal de Nueva York. Terminó el primer ciclo universitario de física en Yale, en 1962, y continuó sus estudios en la Universidad de Harvard, en donde se licenció en 1963 y se doctoró en 1968. De 1968 a 1970 gozó de una beca postdoctoral en el Centro de Física Teórica de la Universidad de Maryland en College Park, incorporándose después al claustro del City College. Cuenta de sí mismo: "Enseñar en un College es una tradición familiar; un bisabuelo, un abuelo y mis padres han sido profesores de un College, como lo son mis tres hermanos."

ERIC BUFFETAUT y RUCHA INGAVAT ("Los vertebrados mesozoicos de Tailandia") colaboran desde 1980 en campañas de excavación de Tailandia. Buffetaut es paleontólogo del Centro Nacional francés de Investigación Científica (CNRS) y trabaja en el Laboratorio de Paleontología de Vertebrados de la Universidad de París. Licenciado por ese mismo centro, se especializó en evolución, paleoecología y paleobiogeografía de los reptiles fósiles, en especial de cocodrilos y dinosaurios. Ha realizado exploraciones en Francia, Canadá, Turquía, Mali, Pakistán, Malaisia y Corea del Sur, además de Tailandia. Ingavat es jefa de la sección de paleontología del Servicio Geológico de Tailandia en Bangokok. Posee la licenciatura por la Universidad de Chulalongkorn en Bangkok y el doctorado en paleontología por la Universidad de Kyushu, Japón. Aparte de sus investigaciones en vertebrados fósiles, está también interesada en los foraminíferos del período Pérmico.

FREDERICK D. SEWARD, PAUL GORENSTEIN y WALLACE H. TUCKER ("Restos jóvenes de supernova") investigan desde hace años en el campo de la astronomía de alta energía. Seward se halla adscrito al Observatorio Astrofísico Smithsoniano de Cambridge, Massachusetts, donde dirige el banco de datos del Observatorio Einstein. Cursó el primer ciclo universitario en Princeton, doctorándose en física nuclear por la Universidad de Rochester en 1958. Desde 1976, Seward trabaja en el Observatorio Astrofísico Smithsoniano; allí se ha especializado en observaciones en rayos X de restos de supernova y estrellas de neutrones. Gorenstein, también astrofísico, pertenece al Observatorio Astrofísico Smithsoniano desde 1973. Licenciado por la Universidad de Cornell y el Instituto de Tecnología de Massachusetts, se recibió de doctor en física por ese centro en 1962; se dedica al proyecto de instrumentos para astronomía de rayos X; entre ellos, los detectores para el Observatorio Einstein orbital. Tucker divide su tiempo entre la investigación, en el Observatorio Astrofísico Smithsoniano, y la docencia en la Universidad de California en Irvine. Estudió en las universidades de Oklahoma y la de California en San Diego, que le otorgó el doctorado en física en 1966.

UWE RADOK ("El hielo antártico") es investigador asociado del Instituto de Cooperación para la Investigación de las Ciencias Ambientales (CIRES), dependiente de la Universidad de Colorado en Boulder y la Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos. Cursó estudios en la Universidad de Melbourne, por la que es doctor desde 1953. En ese centro ha trabajado siempre, ocupando, desde 1961 hasta 1977, la jefatura del departamento de meteorología. Presidió la Comisión Internacional de la Nieve y el Hielo entre 1975 y 1979; desde 1970 hasta 1983 fue secretario del Proyecto Internacional de Glaciología Antártica, de cuyos descubrimientos se da cuenta en su artículo.

JOEL G. KINGSOLVER ("Ingeniería de la mariposa") es profesor adjunto de biología de poblaciones de la Universidad de Brown. Cursó el primer ciclo universitario en Duke y, el segundo, en la Universidad de Wisconsin en Madison. Se doctoró en biología de poblaciones por Stanford en 1981. Tras varios años de becario del Instituto Miller para Investigación Científica Básica, adscrito a la Universidad de California en Berkeley, se incorporó al claustro docente de Brown en 1984. Los conceptos que expone en su artículo surgieron en un curso sobre transferencia del calor en las mariposas, que dictó en Stanford junto con Robert Moffat, del departamento de ingeniería.

Hace…

José M.ª López Piñero

… doscientos años

Martín de Sessé y Lacasta presentó el proyecto que conduciría a la organización de la Real Expedición Botánica de Nueva España, una de las más importantes de las que estudiaron la naturaleza americana durante el período ilustrado.

Nacido en la localidad oscense de Baraguas en 1751, Sessé se formó como médico en la escuela o «academia» que funcionaba en el Hospital de Nuestra Señora de Gracia, de Zaragoza. En 1779, trabajó en el hospital del ejército destinado al bloqueo de Gibraltar y, al año siguiente, se trasladó a América. Durante cuatro años, sirvió como facultativo en diferentes barcos y guarniciones que operaban en las Antillas. Acabó asentándose en la ciudad de México, donde muy pronto consiguió una importante clientela y varios puestos de relieve, entre ellos el de médico del Hospital del Amor de Dios. Concibió entonces el proyecto de organizar una expedición para estudiar la historia natural de Nueva España y de fundar, al mismo tiempo, un jardín botánico en su capital.

Sessé comunicó su idea al virrey en agosto de 1785, en los siguientes términos: "A ninguno se esconde el conato y generosidad con que el rey Nro. Señor ha inspirado y excita al cultivo de las ciencias, y de las artes, preferentemente las que consiernen a la humanidad; hasta estimular con su augusto exemplo a no pocas naciones de la Europa, e influir en sus Ministros el más activo deseo de proporcionar a cualquiera costa todos los socorros que conservan la vida temporal del Hombre. Cuántas fundaciones políticas y piadosas se han hecho con admiración en su glorioso Reinado dan testimonio de esta resplandeciente verdad, y la imitación extranjera la confirma con actos positivos de emular el feliz logro del suceso. En veinte de octubre de mil setecientos sesenta y seis se expidió Real Cédula, encargando a los curas de este Reino la posible aplicación a descubrir, y dar a luz todo lo útil, curioso e importante, que ofrecen de si los tres Reinos, Animal, Vegetal y Mineral, cuya orden por no haber producido aquel interesante efecto, que era de la intención de su Majestad, se reimprimió en las prensas de dn. Felipe de Zúñiga y Ontiveros a veinte y dos de Febrero de el de setenta y dos, para renovar el mismo encargo. Ignora el Exponente el éxito y progresos que haya tenido en esta parte de los Dominios, y sólo sabe que esa máxima de política soberana dispertó a otras cortes las plantas exquisitas de ambas Américas, anticipándose a usurparnos lo más Medicinal, por medio de emisarios inteligentes, a quienes el año de ochenta y dos se mandaron a dar por nuestra corte todos los auxilios que pidiesen, como por lo respectivo a Alemania, se vio en el Reino de Goatemala. Semejante solicitud por nuestra parte no ha padecido igual adormecimiento en las Meridionales; y el Reino de Santa Fe lo está acreditando con felicidad. Este que ha empezado a experimentar muchas ventajas en el desvelo y talentos sublimes de V.E. está en proporción de conseguir lo mismo a menos dilación y costos. No necesita ya el proyecto de echar cimientos a esta grande obra, como en otras Regiones. Los puso en otro siglo el Dr. dn. Francisco Hernández por Comisión Real, en que se erogaron no infructuosamente seiscientos mil ducados; y la muerte de este Físico insigne cortó el término a sus bellas tareas, dexándonos solamente un volumen incompleto, que no es vulgar. Es imposible persuadirse a que el piadoso ánimo de S.M. no se preste a la comunicación de esta excelente obra, original de la idea de uno de sus más gloriosos predecesores, consistiendo ya en costos pocos el Establecimiento de un método que haga efectiva la utilidad y función de los impendios por el Dr. Hernández. La liberalidad con que la Real mano ha dotado en este reino a una Academia de Artes, que sólo ennoblece la vida política de sus vasallos, como son la Pintura, Escultura y Arquitectura, debe radicar nuestra confianza, en que no se escaseará la protección, expensas y fomento que necesita la Farmacia, de que depende la natural, por un fiel y exacto servicio de la Medicina. Poseído de estos sentimientos el que expone y penetrado del más vivo dolor, al ver sepultado en el abandono la inestimable obra del Dr. Hernández, no menos que de observar por una parte la falta de conocimientos Bo-



Ejemplos de los dibujos procedentes de la Real Expedición de Nueva España, organizada por iniciativa del médico aragonés Martín de Sessé. El de la derecha representa una madreselva recogida en Nutka, isla del actual Canadá situada entre la de Vancouver y el continente, a la que José Mariano Mociño dirigió uno de los más famosos viajes de la Expedición. El de la izquierda, un pájaro americano que los expedicionarios dudaron en clasificar entre los túrdidos y los oriólidos, familias zoológicas que entonces estaban todavía mal definidas.

tánicos en este Reino, y por otra, la miseria de mendigar especies en diversos países distantes, cuando la naturaleza los franquea con abundancia en éstos; y no resta otra cosa que fundar una Escuela en donde se instruyan los Profesores de la virtud y servicio de las Plantas: se ofrece el que representa a continuar la citada obra del Dr. Hernández en el mismo idioma, orden que lleva, y no son mejorables, constituyéndose a viajar por los distritos a donde le llame la esquisita indegación y análisis de vegetales, aguas minerales y demás objetos de la salud pública, con la gratificación que se tenga por congruente. Pero como el fruto de este afán sería puramente Teórico, si las noticias hubiesen de quedar encerradas en un libro, sin que a presencia de las mismas plantas medicinales las explicase a los que hayan de profesar la Medicina, y la Farmacia, será igualmente provechoso se establezca una cátedra de Enseñanza, la cual indispensablemente ganen los que pretendan ser examinados y admitidos al exercicio de una y otra facultad, sin exeptuar la cirugía, cuyo desempeño podrá confiarse a la persona que elija el Señor dn. Casimiro Gómez Ortega, Primer Catedrático de Botánica en Madrid, cuya doctrina habrá producido innumerables sujetos de más idoneidad, que la del exponente. Para la presencia de las plantas brinda esta Capital un terreno de competente extensión y amenidad, en donde pueden cultivarse, y al mismo tiempo doctrinarse los cursantes. Este es un Huerto anexo al Colegio de San Pedro y San Pablo, que fue de los Regulares Expulsos, el cual sin variarse las aplicaciones, que a este Colegio haya dado la Real voluntad, o este Superior Gobierno, podrá a muy poco costo emplearse en un Jardín Botánico, que interese al Público, más que cualquiera otra obra. Esta es la idea que ha concebido y presenta a V.E. el que expone, sin otro interés, que el de hacerse útil a la humanidad. La profunda penetración de V.E. tiene sobrada autoridad para ponerla en la censura, si merece su benigna aceptación; estando pronto el exponente a disolver cualquiera dificultad que ocurra, y a simplificar cuando se le mande los medios de este importante Establecimiento en el seguro concepto de que los costos de él consisten únicamente en el corto trabajo del expresado Huerto, labrado ya, y abundante de aguas, en la moderada dotación de la enunciada Cátedra; en la habilitación y transporte del que venga a servirla; en una corta suma que se destine anualmente para el acopio de plantas y salario del Jardinero: y finalmente en la gratificación que merezca el trabajo del exponente. V.E. es el más exacto imitador de su Majestad en el amor a sus pueblos y el Patriota más infatigable en adquirirles ilustración y ventajas; hasta consagrar todo su patrimonio de que acaba de dar una prueba bien notoria en Europa; y en esta fe no duda el que representa hallar en V.E. la activa protección que necesita esta preciosa idea".

Año y medio más tarde, una real orden disponía que la expedición se hiciera realidad, "con el objeto general e importante de promover los progresos de las ciencias físicas, desterrar las dudas y adulteraciones que hay en la medicina, tintura y otras artes útiles y aumentar el comercio". La misma disposición fijaba también, como objetivo especial, "suplir, ilustrar y perfeccionar, con arreglo al estado actual de las mismas ciencias naturales, los escritos originales que dejó el Dr. Francisco Hernández". De esta forma, la gran expedición científica del siglo XVI quedó explícitamente asociada a la que iba a ser, entre las consagradas a la historia natural, una de las más importantes de la centuria ilustrada, junto a las dirigidas por José Celestino Mutis en Nueva Granada y por Hipólito Ruiz y José Pavón en Perú.

Tal como había propuesto Sessé, se fundó simultáneamente el Jardín Botánico de México, disponiéndose que una cátedra anexa al mismo impartiera enseñanza de la disciplina. Antes de dirigirse al virrey, en enero de 1785, el médico aragonés se había puesto en contacto con Casimiro Gómez Ortega, entonces profesor primero en el Jardín Botánico de Madrid. Este informó favorablemente el proyecto y luego prestó su ayuda a la expedición. Lo mismo hizo Antonio Palau Verdera, profesor segundo en el mismo centro, y más tarde Antonio José Cavanilles. Sessé tenía conciencia de que era un autodidacta como naturalista, por lo que pidió a Gómez Ortega que enviase a México uno de sus mejores discípulos. Al mismo tiempo que Sessé era designado director de la expedición, Vicente Cervantes fue nombrado primer catedrático de botánica en México.

La expedición estaba integrada, además, por José Longinos Martínez como naturalista y disector, por un botánico, un farmacéutico, dos dibujantes y personal auxiliar. Más tarde, se incorporaron dos mexicanos discípulos de Cervantes: José Mariano Mociño y José Maldonado. Los trabajos se iniciaron en 1788 y terminaron en 1802. Hasta 1791, se realizaron tres grandes excursiones generales, que cubrieron básicamente los territorios centrales de Nueva España. A partir de esa fecha, grupos concretos exploraron otras zonas más o menos cercanas. Longinos partió de California y por la costa sur llegó a Guatemala, donde fundó un gabinete de historia natural, para terminar en Yucatán, muriendo en Campeche el año 1803. Mociño hizo, entre otros, su famoso viaje a Nutka. El propio Sessé estudió las islas de Cuba y Puerto Rico.

En 1803, Sessé volvió a España con casi treinta cajones que contenían los materiales reunidos en la expedición. La parte más importante correspondía a la botánica, con un herbario de unas tres mil quinientas plantas, de las cuales más de la mitad eran desconocidas para los botánicos europeos. En lo que respecta a la zoología, destacaban las descripciones y dibujos de quinientas especies de aves y casi trescientas de peces, entre las cuales muchas no habían sido estudiadas hasta entonces.

Sessé únicamente llegó a publicar una *Oración inaugural* de la nueva cátedra de botánica (1788). Quedaron inéditos los manuscritos que recogían los resultados de la expedición. Dos de ellos se publicaron a finales del siglo XIX bajo los nombres de Sessé y Mociño.



Protuberancias solares

Entre los fenómenos más espectaculares de cuantos nos ofrece la atmósfera solar destacan las llamadas protuberancias, que semejan elevaciones del borde y aparecen en el limbo

J. L. Ballester y J. Kléczek

El Sol es una enorme esfera de plasma, cuya masa total multiplica por 300.000 la terrestre. Gran parte de esa masa se hurta a la visión del hombre. Los telescopios y otros instrumentos astronómicos sólo divisan la atmósfera solar. El límite entre el interior solar, invisible, y la atmósfera solar, observable, se llama superficie solar o fotosfera. Esta capa inferior de la atmósfera puede observarse a simple vista durante la salida o puesta del Sol, o cuando nubes no muy densas pasan por delante del disco. La temperatura de la fotosfera es de 6000 grados Kelvin y su densidad de 10^{-8} gramos por centímetro cúbico; posee un espesor del orden de los 300 kilómetros, delgadez que no es óbice para que casi toda la energía solar se emita desde la misma.

Sobre la fotosfera se encuentra una capa más enrarecida ($10^{-9} - 10^{-10}$ gramos por centímetro cúbico), con temperatura más alta (10^4 grados K) y cuyo espesor decuplica el de la fotosfera. La contribución de esta capa a la radiación total emitida por el Sol es mucho menor que la aportada por la fotosfera. Esta región emite únicamente en determinadas longitudes de onda, en particular, la línea roja del hidrógeno (Hα), a la que hemos de atribuir el rosado característico de esta capa. Por esa razón, se la llamó "cromosfera", que quiere decir esfera de color.

Por encima de la cromosfera se extiende una capa enormemente enrarecida ($10^{-14} - 10^{-17}$ gramos por centímetro cúbico), con temperatura muy elevada, alrededor de 2×10^6 grados K. A esta capa se la llama corona solar; inmersas en ella se observan nubes de plasma, que adoptan formas diversas, de cien a mil veces más densas y con temperaturas de 10^4 grados K. Estas nubes se asemejan, por su color, densidad y temperatura, a la cromosfera solar; son las protuberancias solares.

Las primeras referencias sobre las protuberancias se remontan a la Edad Media. Su observación se produjo durante eclipses totales de Sol. En estos fenómenos, raros y de corta duración, se distingue, durante algunos segundos, la cromosfera y a lo largo de un período más largo la corona con las protuberancias. Estas destacan sobre el fondo blanco de la corona con formas diversas: bucles, corrientes, nubes y otras.

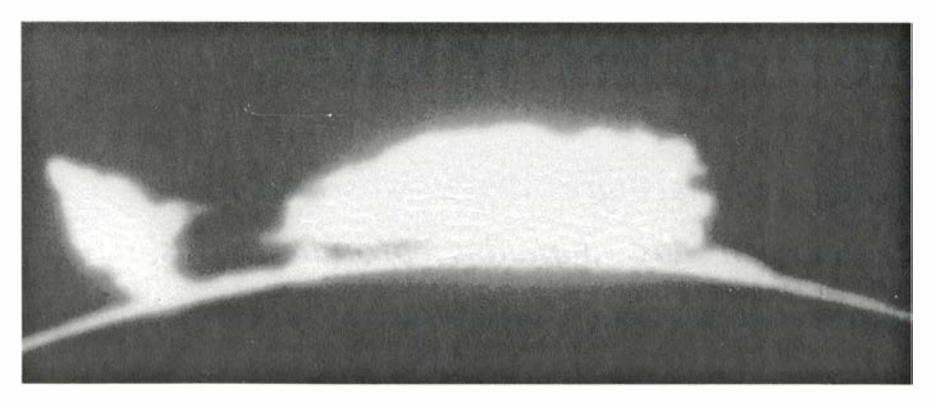
Vassenius las describió con bastante detalle en 1733 y las calificó de "llamas rojas", tomándolas por nubes de la atmósfera lunar. Cien años después, un grupo de observadores de un eclipse total las consideraron montañas solares. A mediados del siglo pasado, Airy y Carrington creyeron que se trataba de nubes solares. La introducción de la fotografía para la observación de los eclipses, en 1860, permitió conocer mejor los tamaños y formas de las protuberancias; los progresos realizados desde entonces en la instrumentación propiciaron un mayor conocimiento del proceso de las mismas.

En 1868, se obtuvieron los primeros espectros de protuberancias y se puso de manifiesto que constituían masas de gas caliente. Se descubrió también que abriendo la rendija del espectrógrafo podían tomarse imágenes monocromáticas. Gracias a la utilización del espectroheliógrafo, que proporciona imágenes monocromáticas del Sol, desde 1890 se han observado las protuberancias proyectadas contra el disco solar: los filamentos. En 1936, el astrónomo francés B. Lyot construyó el coronógrafo, que produce artificialmente eclipses solares totales. Combinado con un filtro birrefringente que sólo transmite la línea Hα, el aparato permitió obtener las primeras películas de protuberancias. En los años sesenta, se inician las primeras mediciones de los campos magnéticos merced al desarrollo del magnetógrafo, llevado a cabo por W. y H. Babcock, con el que se obtiene, a partir del efecto Zeeman en las líneas espectrales de las protuberancias, la componente longitudinal del campo magnético. A lo largo de los últimos años se ha ido avanzando en el estudio de la radiación infrarroja, radio, ultravioleta y X de las protuberancias. Algunas de cuyas observaciones las realizan, desde el exterior de la atmósfera terrestre, cohetes, satélites artificiales y laboratorios orbitales tripulados.

La sistemática observación de los filamentos llevó a H. y W. Babcock a la conclusión de que se situaban siempre sobre la línea neutra que separa dos zonas de diferente polaridad magnética de una misma región activa o sobre la que separa dos regiones activas de diferente polaridad. Posteriores observaciones parecen indicar que la condición necesaria para la existencia de un filamento (y probablemente para su formación) es que la componente vertical del campo magnético local tenga sentidos opuestos a cada lado del filamento en cuestión. Dentro de las regiones activas, y entre ellas, puede observarse en Hα, y antes de la aparición de los filamentos, cómo las fibrillas que perfilan el campo magnético local se alinean una a continuación de otra formando el canal del filamento. Poco a poco, esta estructura se va cubriendo de la materia que dará lugar al filamento propiamente dicho. El tiempo típico de formación de un filamento en una región activa oscila entre horas y un día; fuera de las regiones activas, la formación se realiza más lentamente.

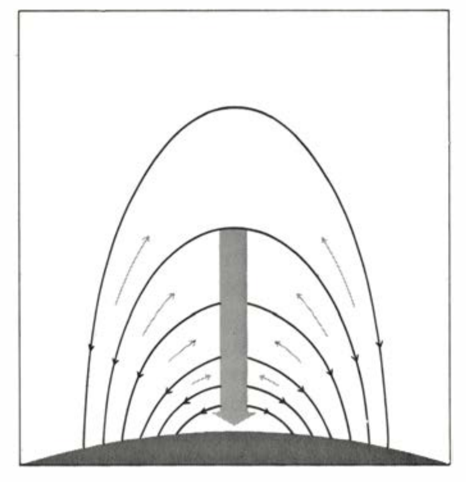
Las dimensiones de un filamento os-

1. PROTUBERANCIA ERUPTIVA observada por el Skylab en el ultravioleta (He II, 304 angstrom) el 19 de diciembre de 1973. Se elevó sobre el borde del Sol hasta una altura de 576.000 kilómetros y estaba formada por material a diferentes temperaturas, que oscilaban entre los 20.000 y 70.000 grados Kelvin. Puede apreciarse la simplificación de la estructura de la protuberancia que tiene lugar hasta que se alcanza la configuración de campo potencial. (Cortesía del Naval Research Laboratory estadounidense.)



2. PROTUBERANCIA QUIESCENTE, del tipo AN, filmada por R. B. Dunn el 28 de septiembre de 1956 en el Observatorio astronómico de Sacramento Peak. A las protuberancias quiescentes que se presentan con este aspecto se les llama de seto vivo. Se apreciaban en ella flujos de materia entre diversas partes de la protuberancia y hacia la cromosfera. El 29 de septiembre de ese mismo año la protuberancia se transformó en eruptiva, elevándose sobre el limbo solar hasta una altura de 250.000 kilómetros.

cilan entre 60.000 y 600.000 kilómetros para la longitud, entre 15.000 y 100.000 para la altura y de 4000 a 15.000 para el espesor. Las vidas medias de los filamentos varían enormemente según estén asociados con regiones activas en desarrollo, en trance de desaparición o con residuos de regiones activas. Para los de latitudes bajas, la vida media parece ser de dos rotaciones solares, mientras que para los filamentos de latitud alta es de 5,1 rotaciones. Para los grandes, la vida media parece ser inversamente proporcional a la intensidad de los campos magnéticos asociados. Los filamentos prefieren zonas de latitud baja y alta, en ambos hemisferios.



3. FORMACION de una protuberancia en una arcada coronal. El plasma es atraído, a lo largo de las líneas de fuerza, hacia la región de inestabilidad, donde se enfría para originar la elevación. El material de ésta fluye hacia la cromosfera a lo largo de filamentos verticales observables en las protuberancias quiescentes. Se obtiene así un modelo dinámico de protuberancia quiescente que permite explicar la pérdida de material, hacia la cromosfera, y su renovación. Si no se produjera esta renovación, la protuberancia iría desapareciendo lentamente, como ocurre en los procesos de disolución en los que el ritmo de renovación del material es inferior al de caída a la cromosfera.

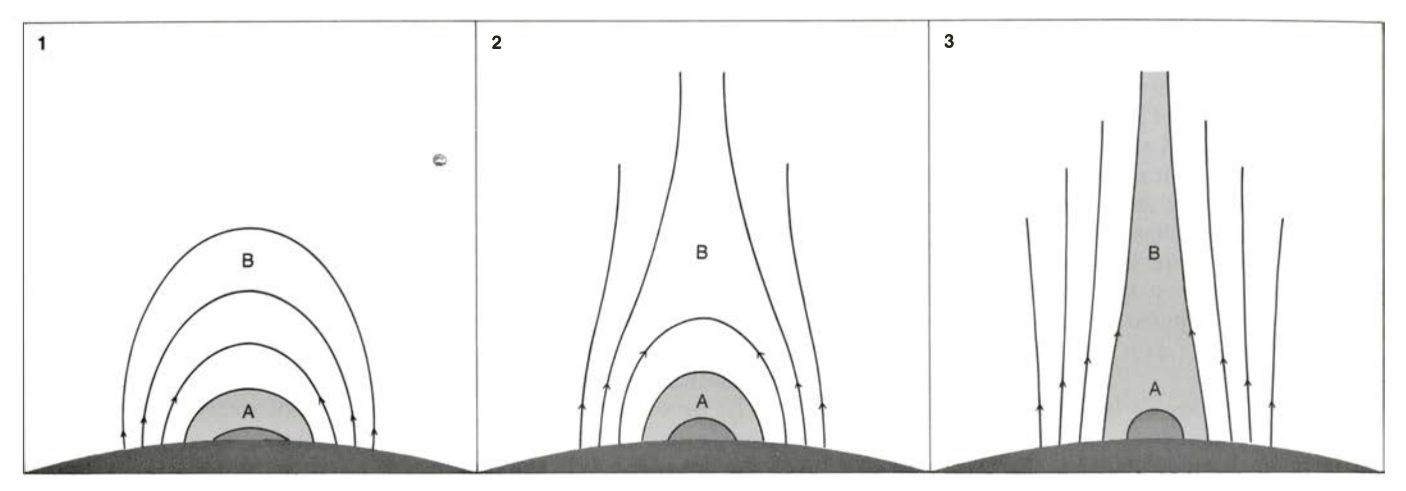
Los de baja, se forman a una latitud media de 30 grados cuando se inicia un ciclo solar y se desplazan progresivamente hacia el ecuador, siendo su latitud al finalizar el ciclo de alrededor de 17 grados. Los filamentos de las zonas de latitud alta empiezan a manifestarse tres años después del máximo de manchas, entre 40 y 50 grados de latitud; se mantienen hasta el mínimo y al comienzo del siguiente ciclo inician una migración hacia latitudes más elevadas, alcanzando los polos al tiempo del siguiente máximo, para desaparecer a continuación. El efecto de la rotación diferencial del Sol tiende a alinear estos filamentos uno a continuación del otro y constituir lo que se llama la corona real alrededor de los 70 grados de latitud.

Las protuberancias suelen desaparecer por disolución lenta o por transformación eruptiva. El primer tipo se da en las que no llegan a desarrollarse del todo; posiblemente, el ritmo de acumulación de material para formar el filamento sea inferior a la cantidad de materia que fluye desde la protuberancia hacia la cromosfera, y así desaparece el filamento. La erupción de una protuberancia podría constituir un episodio normal de su evolución, durante el cual parte de la protuberancia asciende en el interior de la corona a una velocidad de 200 o 400 kilómetros por segundo, y se torna invisible, mientras que el resto fluye hacia la cromosfera.

La masa perdida por el Sol en una protuberancia eruptiva se estima en unos 2×10^{15} gramos y, la energía involucrada, en unos 10^{23} joule. La fase de protuberancia eruptiva afecta en la misma proporción, por lo que se ve, a los filamentos polares y ecuatoriales. Se desconoce la causa que provoca la transformación de una protuberancia en eruptiva, si bien parece obedecer a la aparición de flujo magnético en las inmediaciones o a fulguraciones cercanas (véase "Las fulguraciones solares", de J. I. García de la Rosa, F. Herrera y M. Vazquez; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1982), que podrían inducir algún tipo de inestabilidad en el campo magnético de la protuberancia.

El espectro visible de las protuberancias nos indica su composición y condiciones físicas reinantes en ellas; el espectro continuo, no obstante su debilidad, resulta de la difusión de la radiación fotosférica por los electrones libres de las protuberancias y nos permite determinar la densidad de electrones libres, es decir, el grado de ionización del plasma de las protuberancias. En el espectro de líneas, las de hidrógeno son las más importantes y forman una serie que empieza con la raya $H\alpha$ y termina en el ultravioleta. El espectro contiene también líneas metálicas (Fe I, Fe II, Ti I, Sc II y otros), cuya intensidad relativa varía con los tipos de protuberancias. La amplia variación de las intensidades relativas de las líneas de He I, He II y metálicas, de un tipo de protuberancia a otro, ha sido utilizada por H. Zirin y E. Tandberg-Hanssen para proponer una clasificación espectral de las mismas. Los perfiles de las líneas, que dependen del movimiento de los átomos, nos ayudan a establecer la temperatura cinética y la turbulencia.

Las condiciones físicas de las protuberancias activas difieren de las quiescentes. Si suponemos que todas las líneas las emite el plasma a una misma temperatura obtenemos que, para una protuberancia quiescente, la temperatura es del orden de 6000 grados K, mientras que para las activas se encuentra entre 10^4 y 2×10^4 grados K. La densidad varía entre 10^{10} y 10^{13} partículas por centímetro cúbico, es decir, 10^{-14} y 10^{-11} gramos por centímetro cúbico. Ciertas líneas del espectro ultravioleta nos revelan las condiciones en las partes más calientes de las protuberancias, al par que otras se forman en el plasma a más baja temperatura. Los resultados del ultravioleta pueden contrastarse con los obtenidos a partir de las líneas del espectro visible; de acuerdo con los espectros ultravioleta realizados mediante instrumentos instalados a bordo de satélites artificiales (OSO-8 y el de la misión del máximo solar, SMM), las protuberancias estarían formadas por tubos de flujo magnético a diferentes temperaturas. En algunas protuberancias, los tubos de flujo más fríos se muestran uniformemente distribuidos, mientras que los más calientes se hallan concentrados.



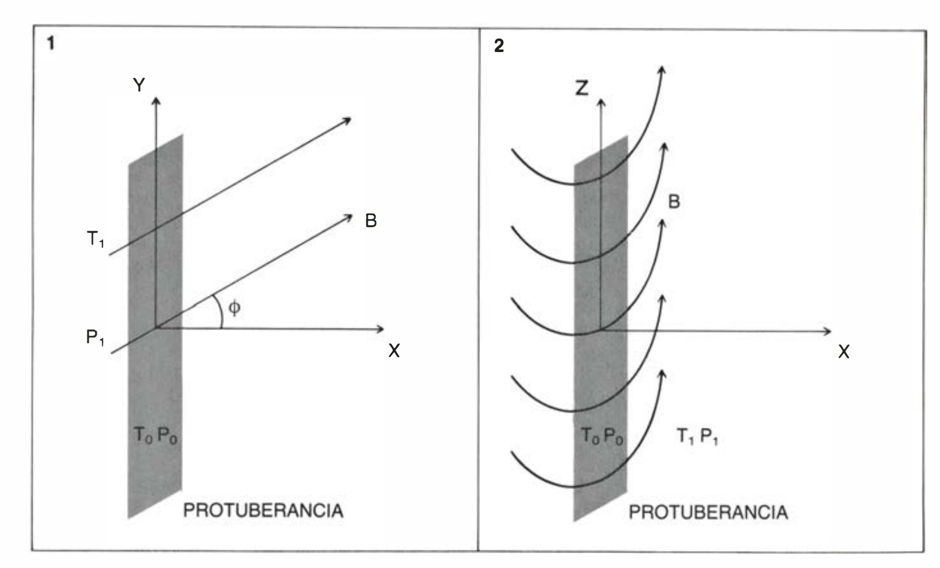
4. FORMACION DE UNA PROTUBERANCIA en una lámina de corriente. A la izquierda (*1*), se muestra la estructura del campo magnético de una región activa antes de que se inicie una fulguración que provocará la apertura de las líneas de fuerza del campo, tal como se observa en el centro (*2*). En la región *B*, situada entre campos magnéticos de sentido opuesto, se produce una lámina de corriente en la que puede iniciarse la formación de una protuberancia quiescente. Posteriormente (*3*), debido a la reconexión magnética, algunas líneas de fuerza se cierran sobre y debajo de la protuberancia dando lugar a la típica configuración de surgencia en chorro y ayudando al soporte de la protuberancia. (Cortesía de M. Kuperus y E. Tandberg-Hanssen.)

El rango de temperaturas se extiende desde 3×10^4 hasta 10^5 grados K, y la densidad electrónica es de 3×10^{11} partículas por centímetro cúbico.

Todo indica que la frontera entre las protuberancias y la corona no está bien definida y que aquéllas se encuentran rodeadas de capas cada vez más calientes que forman una zona de transición semejante a la existente entre cromosfera y corona. La zona del espectro electromagnético correspondiente a la radiación X ha aportado pocos datos relativos a las protuberancias; se ha detectado la emisión X de algunas protuberancias en bucle y hay indicios de asociación entre emisión de radiación X y activación de filamentos, aunque no están totalmente confirmados. Los filamentos pueden observarse, en absorción, a longitudes de onda milimétricas y centimétricas. Por su seguimiento en ondas de radio se sabe que los filamentos tienden a adquirir un tamaño mayor y durar más que cuando se observan en el dominio óptico. A longitudes de onda milimétricas se obtienen temperaturas de brillo de los filamentos del orden de los 6000 grados K, cuatrocientos grados inferior a la del disco; a longitudes de onda centimétricas los valores obtenidos son del orden de 7000 a 14.000 grados K, entre 1000 y 5000 grados inferior a la del disco. (La temperatura de brillo es la de un cuerpo negro cuya intensidad de radiación en el intervalo de frecuencias de ν a $\nu + d\nu$ sea el mismo que el de la fuente observada. La temperatura de brillo de una fuente dada puede variar considerablemente con la frecuencia.)

Tras la desaparición brusca de un filamento, observada en ondas milimétricas, la diferencia entre la temperatura de brillo del filamento y del disco ha decrecido notablemente pasando a ser del orden de los 200 grados K. A tenor de las observaciones realizadas a 3,5 y 9,5 milímetros, la densidad electrónica parece ser del orden de 5×10^{10} partículas por centímetro cúbico. Las protuberancias pueden ser observadas en emisión, a centimétricas y milimétricas, siempre que sobresalgan más de un minuto de arco del limbo solar.

Los filamentos aparecen asociados a disminuciones de la temperatura de brillo. No hay acuerdo a la hora de interpretar estas depresiones registradas en las ondas de radio de los filamentos. Una de las explicaciones parte de la estructura coronal; alrededor de las protuberancias, la corona consiste en una cavidad recubierta de arcos, que se aprecia en las observaciones de la corona K hechas en el limbo, y que parece corresponder a una región cuya densidad es un orden menor que la de la corona no perturbada y cuyas dimensiones en anchura y altura doblan las propias de los filamentos. Las observaciones de emisión X sobre el disco confirman estos datos, aunque no parece que



5. SI CONSIDERAMOS LA PROTUBERANCIA COMO UNA HOJA muy fina de materia, el sistema de referencia se toma con el eje *OY* a lo largo de la protuberancia, el eje *OZ* perpendicular a la superficie solar y el eje *OX* normal a la protuberancia. En el modelo de soporte de protuberancias quiescentes propuesto por Milne, Priest y Roberts en 1979, se observa, a la izquierda, que las líneas de fuerza del campo magnético no son perpendiculares a la protuberancia, como en el modelo de Kippenhahn-Schlüter (K-S), sino que forman con ella un cierto ángulo Φ. Si Φ fuera igual a cero, tendríamos el modelo de K-S. A la derecha se ilustra la deformación de las líneas de fuerza en las que se soporta la materia. Asimismo, en el modelo de K-S la temperatura de la protuberancia y de la corona se suponían iguales. En este modelo, las temperaturas son diferentes, donde (T_1, p_1) simbolizan la temperatura y presión de la corona y (T_0, p_0) la temperatura y presión de la protuberancia. (Cortesía de Milne, Priest y Roberts.)

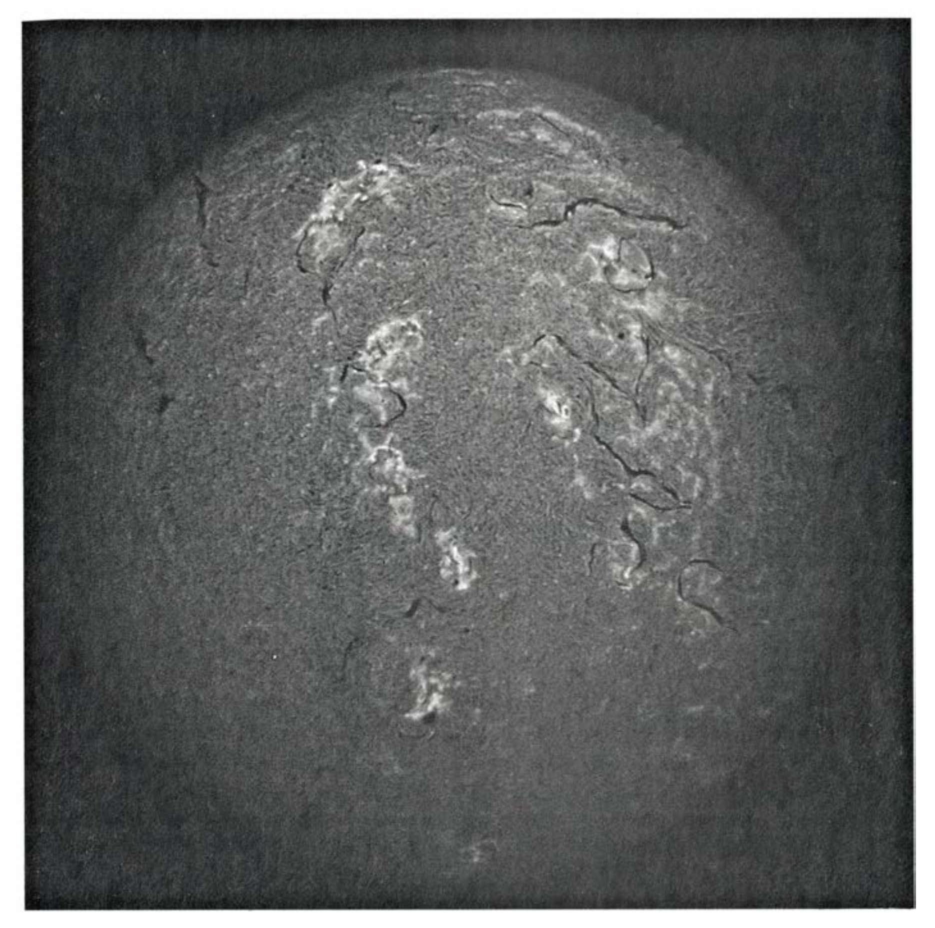
la ausencia de materia a temperaturas coronales pueda, por sí sola, explicar las depresiones radio. Las observaciones efectuadas por el Skylab en el ultravioleta y en rayos X señalan la existencia de una capa de transición entre cromosfera y corona, donde la temperatura varía desde 10^4 hasta 10^6 grados K. ¿Por qué las protuberancias pueden mantenerse, pues, a una temperatura tan baja en el espacio coronal mucho más caliente? En razón del aislamiento magnético.

Las propiedades de las protuberancias admiten explicación en el marco de la magnetohidrodinámica (MHD). Esta rama de la física combina las leyes de la mecánica de fluidos con el electromagnetismo. La aplicación de la MHD a las protuberancias se funda en la naturaleza de éstas: plasmas de conductividad muy elevada sumergidos en campos magnéticos. Las protuberancias pueden considerarse así constituidas por dos componentes fundamentales: el plasma y el campo magnético. Las protuberancias solares están estrechamente ligadas a los campos magnéticos que emergen desde las capas subfotosféricas, a través de la fotosfera y de la cromosfera, hacia la corona. Si los tubos de flujo magnético contienen plasma coronal caliente, se presentan formando arcos, bucles o rayos coronales con los telescopios de rayos X, coronógrafos en órbita o desde la superficie terrestre, filtros adecuados para la línea del Fe XIV, por ejemplo. Si los tubos de flujo contienen plasma de baja temperatura, pueden observarse, como protuberancias, en líneas de hidrógeno (Hα), calcio ionizado y helio.

Los métodos utilizados habitualmente en la determinación de los campos magnéticos, en las protuberancias y en la baja corona se dividen en dos clases: los que hacen uso del efecto del campo magnético sobre la radiación electromagnética (efecto Zeeman, efecto Hanle) y los que se basan en argumentos teóricos (campo potencial). El efecto Zeeman produce un desdoblamiento de la línea espectral en tres componentes; a saber: una componente *p* no desplazada y polarizada linealmente y dos componentes *s* desplazadas en sentidos opuestos cierta distancia ($\Delta\lambda$). Este $\Delta\lambda$ es proporcional a la intensidad del campo magnético y al cuadrado de la longitud de onda. En un campo magnético intenso, las dos componentes *s* están separadas y su desplazamiento puede recogerse en una fotografía del espectro y determinarse la intensidad del campo; así se establecen los campos magnéticos de las manchas solares. Sin embargo, en las protuberancias los campos son más débiles, hasta el punto de que las componentes *s* están solapadas y no puede medirse el $\Delta\lambda$. Para determinar el campo magnético, se recurre a los sentidos de polarización de las componentes de la línea espectral. La determinación de los campos magnéticos de las protuberancias exige conocer el estado de polarización de ciertas líneas espectrales.

El efecto Hanle consiste en la modificación, por el campo magnético local, de los parámetros de la polarización lineal de una línea espectral. En las protuberancias solares, el campo magnético hace rotar el vector de polarización y disminuir el grado de polarización lineal. Ambos parámetros dependen de la intensidad y dirección del campo. Pero si la intensidad del campo magnético es mayor que 30 gauss se destruye la polarización de cualquier línea del espectro visible, lo que dificulta la aplicación de este método a protuberancias que no sean quiescentes. El método teórico más utilizado es el del campo potencial. En él se supone que las corrientes eléctricas en la cromosfera y en la baja corona son despreciables; el campo magnético admite entonces un potencial escalar que satisface la ecuación de Laplace. Este método, desarrollado, en 1964, por H. Schdmidt, del Instituto Max Planck de Física y Astrofísica, proporciona la estructura tridimensional del campo magnético, empleando como condición de contorno la componente del campo magnético fotosférico en la dirección de la línea de visión. A causa de sus limitaciones, sólo podía aplicarse al centro del disco solar. Posteriormente, Altschuler y Newkirk, del High Altitude Observatory, mejoraron el método y lo extendieron a todo el disco solar; se descubrió un Sol cubierto de líneas de fuerza que, si lo comparamos con fotografías de eclipses totales, comprobaremos la concordancia entre las estructuras magnéticas predichas y las observadas.

Fuera de las regiones activas se obtienen resultados aceptables, pero en ellas los resultados observacionales y teóricos difieren hasta factores de orden cinco por la sencilla razón de que existen corrientes eléctricas que hacen que el campo no sea potencial. Por otra parte, los movimientos de protuberancias han evidenciado ser un método indirecto bastante útil para inferir el ca-



6. CROMOSFERA SOLAR vista en Hα. En esta fotografía tomada en el Observatorio de Izaña (Tenerife) se observan los filamentos que, posteriormente, al pasar por el limbo vemos como protuberancias quiescentes. Las dimensiones típicas de estos filamentos oscilan entre 60.000 y 600.000 kilómetros para la longitud, 15.000 y 100.000 kilómetros para la altura y entre 4000 y 15.000 kilómetros para su espesor.

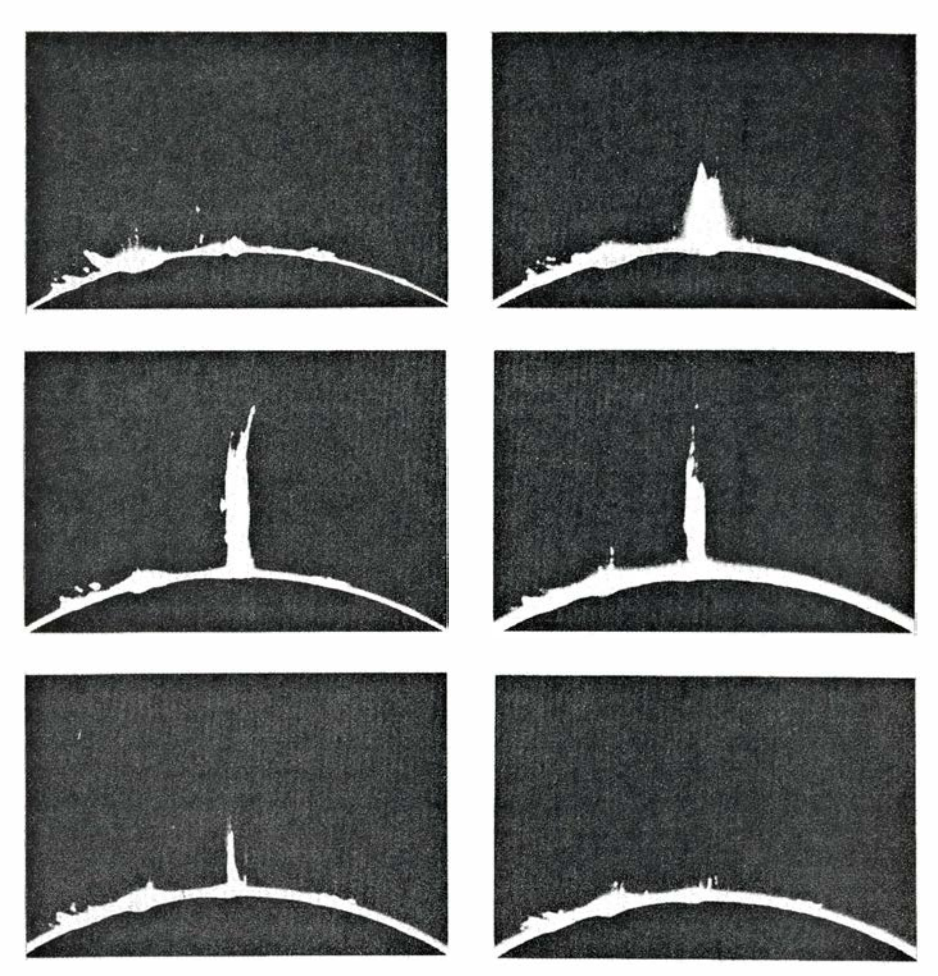
rácter de los campos magnéticos en ellas. Desde la década de los cincuenta muchos autores se han preocupado de la relación existente entre los movimientos de las protuberancias y los campos magnéticos, y han hecho sentir la necesidad de poseer una imagen tridimensional de los movimientos al objeto de poder estudiar la dinámica de las protuberancias y la configuración de los campos magnéticos en la corona. Los autores de este artículo han trabajado en esta dirección obteniendo valores de los campos magnéticos del orden de 170 gauss para protuberancias activas, y del orden de 50 gauss para eruptivas. Resumiendo, el objetivo último de todos los esfuerzos es la obtención del vector campo magnético de las protuberancias, es decir, su módulo y su orientación, y así ponderar los diferentes modelos de protuberancias.

Los campos magnéticos se observan siempre como consecuencia de corrientes eléctricas. Esto es válido en todo el universo y el Sol no es una excepción. Protuberancias, estructuras coronales, manchas, fulguraciones y otros fenómenos son consecuencia de la variabilidad de los campos magnéticos, es decir, de las corrientes eléctricas que los producen. Los campos magnéticos de la atmósfera solar desaparecen por aniquilación o son transportados por el viento solar hacia el espacio interplanetario. Nuevos campos magnéticos emergen desde las capas subfotosféricas, en su gran mayoría como regiones bipolares relativamente pequeñas y de intensidad elevada.

Como consecuencia de la gran variabilidad de los campos magnéticos, las protuberancias adoptan diferentes formas, tamaños y brillos; pueden ser muy activas o evolucionar lentamente, aparecer casi instantáneamente o ser su formación progresiva; su desaparición puede tener el mismo carácter y su vida durar desde minutos hasta meses. Las protuberancias presentan una gran diversidad de movimientos, tales como flujo regular a lo largo de los tubos magnéticos, turbulencia en quiescentes, oscilaciones, centelleo como consecuencia de grandes fulguraciones, retorcimiento de los tubos de flujo, eyecciones, erupción de quiescentes, migración hacia el polo o hacia el ecuador, etcétera. Actividades que se producen por la interacción de los campos magnéticos con el plasma.

Con el fin de ordenar ese amplio abanico de fenómenos que se presentan en las protuberancias, se han propuesto distintas clasificaciones de las mismas. Secchi las dividió, en 1875, en dos clases según la intensidad de las líneas de hidrógeno y de los metales. Waldmeier utilizó la comparación de las líneas de magnesio neutro y hierro ionizado y las dividió, en 1949, según las intensidades relativas de estas líneas. Zirin, del Observatorio Big Bear de California, y E. Tandberg-Hanssen, ahora en el Marshall Space Flight Center, propusieron, en 1960, comparar las intensidades de las líneas de estroncio y titanio ionizados. Otra gavilla de sistemas clasificadores se apoyan en la forma y el comportamiento de la protuberancia; entre éstos, los más conocidos son el de Pettit y el de Menzel-Evans. En la clasificación de Menzel-Evans se reconocen cuatro clases fundamentales: *AN, BN, AS; BS*. La letra *A* (de *above*, arriba) denota las protuberancias que se forman desde arriba. La letra *B* (de *below*, abajo) designa las protuberancias cuyo plasma es eyectado desde la fotosfera y cromosfera hacia la corona. La segunda letra indica el lugar en que se encuentra la protuberancia. El primer tipo *S* (de *spot*, mancha) corresponde a protuberancias activas conectadas con campos magnéticos fuertes que existen en las regiones con manchas solares. El tipo *N* (de *no-spot*, sin mancha) corresponde a protuberancias con campo magnético débil, es decir, fuera de las regiones activas con manchas. En el caso de las protuberancias de clase *S*, su densidad de energía magnética es mucho mayor que la densidad de energía cinética del plasma, por cuya razón adquieren formas bien definidas, ya que el plasma se ve obligado a amoldarse a las líneas de fuerza magnéticas. Por el contrario, en las de tipo *N*, el campo magnético débil tiene un papel secundario y el plasma domina, la turbulencia prevalece y las protuberancias son irregulares, retorcidas y complejas. Las protuberancias quiescentes son las más representativas de las de tipo *N*, pero en un cierto momento la componente magnética pasa a ser dominante y la protuberancia inicia un cambio, simplifica su estructura y se transforma en un gran bucle que se expande: se ha convertido en protuberancia eruptiva.

La explicación de cómo es posible, tanto mecánica como térmicamente, que las protuberancias quiescentes se mantengan en un estado cuasi-



7. SURGE, protuberancia del tipo *BS*, filmada por W. O. Roberts el 12 de junio de 1946 en la Estación Climax del Observatorio de Gran Altitud, por cuya cortesía la publicamos aquí. Con el desarrollo de la protuberancia se observa que se trata de una eyección de materia a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético que confinan el material produciendo este típico aspecto de chorro. El material asciende y desciende con movimiento helicoidal, lo que revela que las líneas de fuerza están retorcidas.

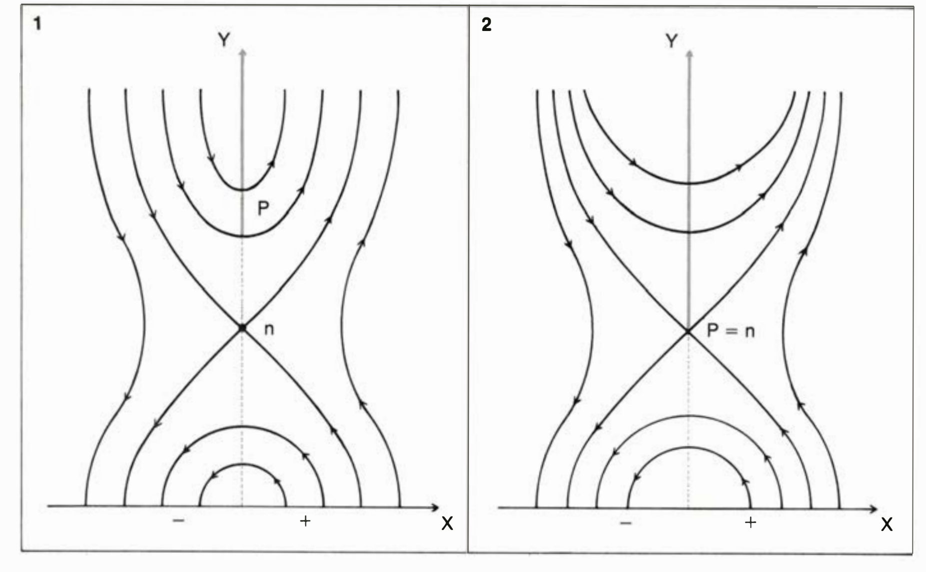
estacionario en el interior de la corona, junto con los mecanismos de formación, son, quizá, los problemas fundamentales de la física de protuberancias. Algunos han propuesto que las protuberancias se forman por condensación de material de la corona. Parten de la suposición según la cual habría una inestabilidad térmica en el plasma coronal. Si el equilibrio térmico de un plasma de temperatura T_c y densidad n_c es inestable, la formación de una condensación de temperatura más baja y densidad mayor es posible. La interacción del campo magnético con el plasma complica el tratamiento del proceso de condensación, aunque, por otra parte, el campo magnético actúa como protector de la condensación frente a su desaparición por conducción de calor. Los diferentes sistemas de ecuaciones empleados para resolver el problema difieren en la ecuación de energía utilizada. Cuando se inicia la inestabilidad, la presión desciende y el material es arrastrado hacia la condensación que se inicia. Un cierto número de objeciones tales como requerimientos de masa, escalas de tiempo necesarias para la formación, condensación a través de las líneas de fuerza del campo magnético y otros se formularon contra este mecanismo de formación.

Aun cuando muchas de las objeciones pueden ser obviadas, las observaciones sugieren que ciertas protuberancias (las de tipo *B*) se forman desde abajo, y que el proceso de formación de las de tipo *AS* difieren de las del tipo *AN*. Lo mismo cabe afirmar entre las de tipo *B* y las de *AS*; en este caso, sin embargo, el campo magnético es fundamental. En el tipo *B*, el campo magnético fotosférico y el subfotosférico eyectan el material contenido en sus tubos de flujo. En los surges, el plasma se eyecta hacia arriba a lo largo de las líneas de fuerza del campo. El plasma diamagnético es arrastrado hacia las zonas de campo magnético más débil, y se observa su ascensión con un movimiento de enroscamiento para caer otra vez hacia la cromosfera siguiendo el mismo camino. Otro tipo de protuberancias de la clase *BS* son las pulverizadoras (*sprays*). En ellas, los tubos de flujo emergen desde las capas subfotosféricas y se expanden, con velocidad creciente, arrastrando consigo el material contenido en su interior. Pulverizadoras y eruptivas son las protuberancias más energéticas.

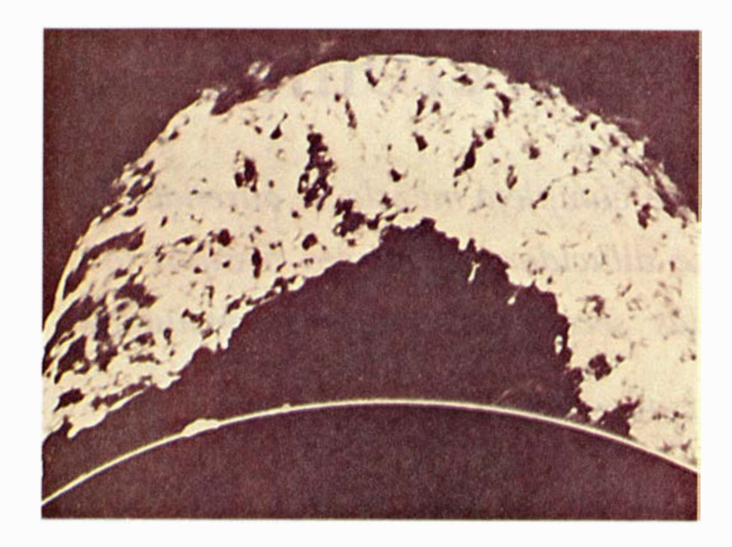
En el tipo *AS* el campo magnético sirve para capturar la radiación corpuscular que se escapa de la superficie solar. Las fulguraciones producen un flujo muy intenso de corpúsculos. La cantidad total de partículas emitidas durante una fulguración se estima en 10^{39} protones, el mismo número de electrones y un 8 por ciento de partículas alfa. Una parte de este flujo es capturado en los bucles magnéticos coronales y la otra escapa hacia el espacio exterior produciendo una tormenta interplanetaria. La parte capturada se termaliza, es decir, las partículas alcanzan, mediante colisiones, una distribución maxwelliana de velocidades. A este conjunto de partículas puede asignársele una temperatura como parámetro que caracteriza la distribución de Maxwell; es decir, la radiación corpuscular se ha transformado en plasma de alta temperatura (10^7 grados K o más).

El plasma, muy caliente, contenido en las partes superiores de los bucles, pierde energía por radiación, sobre todo *X*, y se enfría en pocos minutos hasta temperaturas de 10^4 grados K. Durante el descenso de temperatura, los átomos de hidrógeno y de otros elementos se recombinan y emiten ya en Hα. Esta es la fase de aparición de las protuberancias en bucle. En los coronógrafos y otros telescopios equipados con filtro Hα aparece la parte superior de los bucles como arcos brillantes y se observa cómo el plasma cae hacia la cromosfera. Entretanto, en el arco continúa la condensación y la caída y nuevos bucles surgen a mayores alturas. El proceso de formación de este tipo de protuberancias se realiza a un ritmo muy rápido en los primeros quince o veinte minutos y subsiste a un ritmo más lento durante algunas horas. Se crea un ciclo de tres fases: radiación corpuscular por fulguración, captura y termalización y, por último, enfriamiento y caída hacia la cromosfera.

El proceso de formación de las protuberancias de tipo *AN* (quiescentes) difiere de las clasificadas dentro del tipo *AS*. Se han propuesto dos modelos. De acuerdo con el primero, la protuberancia se forma, por inestabilidad térmica, en un campo magnético (libre de fuerzas magnéticas); en esta suerte de campos, el vector densidad de corriente tiene la misma dirección que el vector campo magnético; por ello la fuerza magnética es nula. Adoptando un campo magnético cuyas líneas de fuerza sean arcadas, partiendo de las ecuaciones de la magnetohidrostática y haciendo uso de una ecuación de energía que suponga que el plasma se encuentra en equilibrio térmico, puede obtenerse la distribución de densidades y temperaturas de una arcada coronal. La variación de ciertos parámetros iniciales produce efectos que modifican las soluciones. Si crece la temperatura en la base de la arcada, la conducción es más importante y aumenta la cantidad de plasma que se encuentra a una misma temperatura. Si aumenta la densidad, predomina el término de radiación y se produce el efecto contrario al caso anterior. En cuanto un parámetro alcanza un valor crítico, el plasma empieza a enfriarse para formar la protuberancia; mientras el plasma se enfría, nuevo material es atraído hacia la región de inestabilidad, a lo largo de las líneas de fuerza, hasta que la protube-



8. SOPORTE de una protuberancia en una lámina de corriente del tipo Kuperus-Raadu. En ambas figuras se observa cómo la componente horizontal del campo magnético sufre una inversión entre la fotosfera y la protuberancia, y la existencia de un punto neutro (*n*) en la configuración magnética. La protuberancia (*P*), representada por el trazo grueso, se encuentra en ambos casos sobre la lámina de corriente. Las configuraciones corresponden al caso de láminas de corriente infinitas en la dirección del eje *OY*, con un punto neutro debajo o en la base de la protuberancia. (Cortesía de Malherbe y Priest.)



9. PROTUBERANCIA ERUPTIVA observada en la estación Climax del Observatorio de Gran Altitud el 4 de junio de 1946. Se elevó sobre el limbo solar hasta una altura de 700.000 kilómetros. Cuando se contempla la filmación de una protuberancia eruptiva, se aprecia cómo la estructura retorcida tiende a simplificarse y se ve cómo una parte del material escapa del Sol mientras otra fluye hacia la cromosfera a lo largo de trayectorias helicoidales o espirales.



10. PROTUBERANCIAS EN BUCLE filmadas por R.B. Dunn, en Sacramento Peak, el 22 de noviembre de 1956. En esta clase de protuberancias del tipo *AS* la materia se ve obligada a seguir las líneas de fuerza del campo magnético y desciende a lo largo de ellas en las dos ramas del bucle. Muchas veces estas protuberancias aparecen tras una fulguración delineando la configuración magnética sobre la región en la que se ha producido la fulguración.

rancia está totalmente formada. Constituida ésta, el material empieza a fluir hacia la cromosfera a lo largo de filamentos verticales muy finos, y tenemos así un modelo dinámico de protuberancia quiescente.

Vayamos con el segundo modelo propuesto para la formación de protuberancias quiescentes. Se trata de las llamadas láminas de corriente, que se producen cuando dos regiones de campo magnético uniforme, de la misma magnitud y sentidos opuestos, entran en contacto. Las láminas de corriente pueden aparecer, por ejemplo, en la frontera entre dos regiones magnéticas débiles de polaridad opuesta que se mueven una hacia otra o, también, tal como propusieron en 1967 M. Kuperus, del Observatorio de Utrecht, y E. Tandberg-Hanssen, entonces en High Altitude Observatory, cuando las líneas de fuerza del campo magnético de una región activa se abren y una protuberancia se condensa en la lámina de corriente resultante. Durante este proceso algunas líneas de fuerza se cierran sobre la protuberancia, dando lugar a una surgencia en chorro. Cuando el plasma se condensa y arrastra consigo al campo magnético, el aumento de presión magnética que inhibiría la condensación queda contrarrestado por el inicio de una inestabilidad magnetohidrodinámica que crea bucles magnéticos que aislan el plasma. Asimismo, la reconexión de las líneas de fuerza magnéticas produce un campo cerrado en la base de la lámina de corriente, que ayuda a soportar el plasma de la protuberancia. La condensación se inicia merced a una inestabilidad térmica que aparece cuando la longitud de la lámina de corriente es superior a un valor crítico de alrededor de 10^5 kilómetros.

La observación de las protuberancias mediante los magnetógrafos ha puesto de manifiesto que el campo no es exactamente perpendicular a la protuberancia, sino que existe una componente del campo a lo largo de ella. Algunos autores han dejado de lado la cuestión del equilibrio magnetohidrostático y se han ceñido al balance energético.

De lo que se trata es de desarrollar un modelo que trate conjuntamente la magnetostática y la energética. En 1979, Milne y Priest, de la Universidad de St. Andrews, diseñaban el modelo siguiente: partiendo de la ecuación de la magnetohidrostática, de la ecuación del gas ideal y de una ecuación de energía y suponiendo, además, que las variables dependen sólo de una coordenada, las soluciones que se obtienen vienen determinadas, fundamentalmente, por β, relación entre la presión del plasma coronal y la presión magnética. Característica de este modelo es la existencia de valores máximos de β que hacen posible la existencia de estados de equilibrio. El punto débil de este modelo reside en su carácter unidimensional, pero no se olvide que los bidimensionales y tridimensionales resultan de difícil tratamiento.

Los fenómenos coronales conocidos como transitorios se han observado frecuentemente desde que se dispone de coronógrafos en órbita. Combinando las observaciones realizadas por el coronógrafo del Skylab con las realizadas desde la Tierra, se ha puesto de manifiesto la estrecha correlación entre los fenómenos coronales de eyección de masa y la actividad cromosférica en Hα. Tres cuartas partes de los transitorios parecen originarse en o cerca de las regiones solares activas; de los transitorios observados durante el período de tiempo comprendido entre mayo de 1973 y febrero de 1974, un 40 por ciento estuvo asociado a fulguraciones, un 50 por ciento a protuberancias eruptivas sin fulguración asociada y más de un 70 por ciento con protuberancias eruptivas o desapariciones de filamentos con o sin fulguración asociada. Se ha llegado a la conclusión de que en un transitorio la densidad de energía magnética es mayor que la densidad de energía cinética y térmica, lo que quiere decir que estos fenómenos están controlados magnéticamente y que es necesario un mecanismo magnetohidrodinámico para explicar su movimiento. Además, a la vista de la estrecha asociación entre protuberancias eruptivas y transitorios se ha intentado proponer un mecanismo que relacione como causa y efecto estos dos fenómenos.

Las protuberancias solares representan espectaculares ejemplos de magnetohidrodinámica a gran escala y, aunque se comprende su naturaleza y su relación con el resto de la actividad solar, existen un gran número de problemas abiertos en la física de las protuberancias. Todavía nos encontramos, pues, lejos de lo que afirmaba el Padre Secchi en su libro *Le Soleil*, escrito en 1875: "el fenómeno de las protuberancias es ya tan bien conocido que parece innecesario repasar la historia de su descubrimiento".

La célula suprarrenal cromafín

Sintetiza, almacena y segrega al medio una compleja mezcla de adrenalina, proteínas y péptidos. Con su estudio se dilucidan, al mismo tiempo, los mecanismos que atañen a otras células secretoras, neuronas incluidas

Stephen W. Carmichael y Hans Winkler

En situaciones de miedo o de agobio, una oleada de adrenalina dispone al organismo para una respuesta física inmediata de máxima intensidad. La hormona invade el torrente sanguíneo hasta alcanzar concentraciones 300 veces superiores a la normal y actúa sobre receptores celulares de diversos órganos, aumentando la frecuencia de latidos cardiacos, elevando la presión sanguínea y liberando del hígado cantidades suplementarias de azúcar que alimenten el trabajo muscular. En conjunto, tales reacciones constituyen una respuesta de "lucha o huida", de preparación al combate o de fuga ante el peligro. Son, en suma, el resultado final de un proceso secretor de la médula suprarrenal, constitutiva de la porción interna de ambas glándulas suprarrenales, situadas por encima mismo de los riñones. En dicha médula se encuentran las llamadas células cromafines, que producen, almacenan y segregan una compleja mezcla de hormonas, entre las cuales se cuenta, en lugar destacado, la adrenalina.

El interés que ofrecen las células cromafines no se limita a su decisivo papel en las reacciones de lucha o huida, sino que responde también a la información que arrojan sobre el funcionamiento de otras células secretoras, especialmente las células nerviosas, o neuronas. La médula suprarrenal es una glándula endocrina, carente por tanto de conducto excretor, que actúa sobre otros tejidos y órganos mediante la descarga de hormonas al torrente sanguíneo. Puede igualmente considerarse parte del sistema nervioso simpático, implicado en la regulación de funciones involuntarias, tales como el ritmo cardiaco, motilidad intestinal y dilatación de la pupila. A semejanza de las neuronas de este sistema, la médula suprarrenal está controlada por nervios que parten de la médula espinal; y su hormona primaria, la adrenalina, está íntimamente relacionada con la noradrenalina, el neurotransmisor característico de los nervios simpáticos. (Adrenalina y noradrenalina suelen denominarse también epinefrina y norepinefrina.) Por otra parte, la propia médula suprarrenal segrega algo de noradrenalina y libera las sustancias activas conocidas como neuropéptidos.

La secreción de hormonas por parte de las células cromafines provoca una respuesta de gran amplitud, que contrasta con la de las neuronas, dotadas de finos axones que abordan los órganos diana y ejercen un control localizado en sus terminales axónicos. Ahora bien, las células cromafines cultivadas in vitro emiten prolongaciones axoniformes, indicio de su estrecho parentesco con las neuronas. Se dispone ya de células cromafines en cultivos relativamente puros como material accesible al análisis bioquímico (no sucede así con las neuronas simpáticas, desparramadas por el cuerpo), lo que ha permitido emplearlas de modelo neuronal de laboratorio; mucho se ha logrado conocer, por su estudio, de la secreción de neurotransmisores.

Las células cromafines deben su nombre al color producido por una reacción química de la adrenalina. Ya en el siglo XIX se comprobó que una sustancia no identificada de la médula suprarrenal reaccionaba con el cloruro férrico produciendo una coloración verdosa y, con sales de cromo, produciendo coloración pardo-amarillenta. Alfred Kohn, en Praga, acuñó, a principios de nuestro siglo, el término cromafín para las células teñidas por el cromo; casi simultáneamente se aisló y sintetizó en el laboratorio la adrenalina, la sustancia celular responsable de la reacción.

El primer indicio del mecanismo de almacenamiento de adrenalina por parte de la célula cromafín data de 1953. Hermann Blaschko y Arnold Welch, de la Universidad de Oxford, así como Nils-Åke Hillarp y colaboradores, del Instituto Carolino, fragmentaron células de la médula suprarrenal valiéndose de homogenizadores especiales e investigaron la presencia de adrenalina y noradrenalina en la mezcla resultante. Si bien se advirtió su ausencia del citosol, la fase acuosa donde se dispersan los elementos celulares, al centrifugar la mezcla las hormonas se desplazaban al fondo del tubo.

Quedaba claro que las hormonas no se encontraban como moléculas libres en el citosol, sino encerradas en orgánulos subcelulares. Jeffrey D. Lever, actualmente en el University College de Cardiff, así como otros investigadores, obtuvieron electromicrografías que revelaban la presencia de dichos orgánulos. Se trata de pequeñas vesículas, o sacos limitados por su membrana, de unas 0,3 micras de diámetro. Según los cálculos de John H. Phillips, de la Universidad de Edimburgo, una sola célula cromafín contiene unos 30.000 gránulos o vesículas de ese tipo. El descubrimiento de tales vesículas estableció por primera vez, en una glándula endocrina, un patrón de almacenamiento, común, según se sabe hoy, en toda célula que segregue hormonas o neurotransmisores.

¿Cómo se sintetizan las hormonas contenidas en las vesículas cromafines? Blachko propuso, en 1939, que el organismo fabrica la adrenalina a partir del aminoácido tirosina, en un proceso de cuatro pasos, cada uno catalizado por una enzima diferente. A partir de entonces, otros investigadores han trazado la biosíntesis en detalle.

El primer paso, la conversión de la tirosina en dopa, está catalizado por la tirosín-hidroxilasa, presente en el citosol de las células cromafines. Una segunda enzima, la dopa-descarboxilasa, también del citosol, transforma rápidamente la dopa en dopamina. En la tercera fase, la dopamina se convierte en noradrenalina por acción de la dopamina-beta-hidroxilasa, que sólo se encuentra en el interior de las vesículas cromafines. Habrá que introducir, por

tanto, la dopamina en tales vesículas para que proceda la síntesis.

Torgeir Flatmark, de la Universidad de Bergen, y sus colegas han comprobado que las vesículas son ricas en una segunda sustancia, que resulta esencial para la producción de noradrenalina: el ácido ascórbico, o vitamina C. La dopamina-beta-hidroxilasa probablemente dependa del ácido ascórbico como cofactor. Muy posiblemente, el ácido ascórbico actúe de donante de electrones y, en ese proceso, se convierta en semidehidroascorbato, tal como demostraron Emanuel Diliberto y sus colegas, de los Laboratorios de Investigación Wellcome. La enzima necesaria para reconstituir el ácido ascórbico y mantener la nueva síntesis de noradrenalina se encuentra solamente en el citosol, lo cual presupone la exigen-



1. CELULA CROMAFIN repleta de vesículas, o sacos intracelulares, que contienen adrenalina o noradrenalina, además de gran variedad de proteínas y péptidos. La amplia formación ovalada es el núcleo celular. Las formaciones subcelulares aparecen destacadas por la aplicación de la técnica de criofractura: se congeló rápidamente una célula, fracturándola seguidamente. Rociando platino y carbono sobre la superficie fracturada se obtuvo una réplica del relieve; se disolvió el tejido y de la réplica se obtuvo una micrografía electrónica de transmisión. La que vemos aquí amplía la célula 15.300 veces.

cia de un ligando bioquímico entre el interior de la vesícula y dicho citosol. El citocromo b_{561}, una de las proteínas más abundantes en la membrana vesicular, es, según se cree, la molécula que transfiere electrones, a través de la membrana, hacia el semidehidroascorbato, renovando la provisión de ácido ascórbico.

En algunas células de la médula suprarrenal (el 10 por ciento en la especie humana), el proceso de síntesis termina en la noradrenalina, tal como acontece en los nervios simpáticos, pero en el resto (la mayoría de las células) la noradrenalina se convierte en adrenalina bajo la acción de la feniletanolamina N-metiltransferasa. Puesto que esa enzima se encuentra sólo en el citosol, la noradrenalina debe escapar de las vesículas y reingresar, ya como adrenalina, para su almacenamiento.

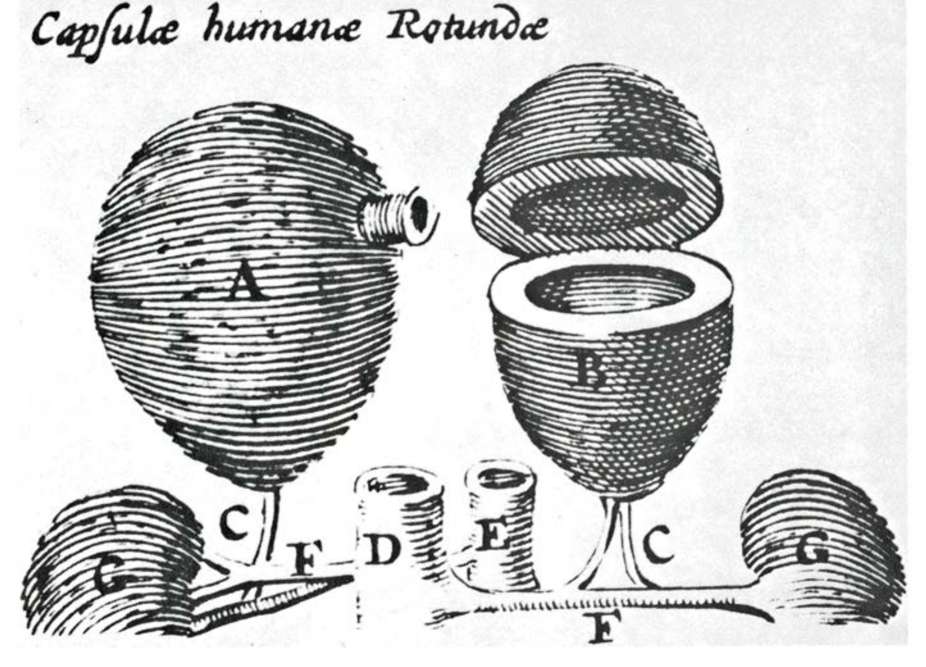
Los mecanismos reguladores de la velocidad de síntesis de la adrenalina actúan principalmente en el primero de los cuatro pasos del proceso, aquel en el que la tirosina se convierte en dopa por acción de la tirosín-hidroxilasa. Tanto el número de moléculas de esta última como su estado de activación determinan la velocidad de síntesis. Cuando el organismo pasa repentinamente a una situación de agobio (*stress*), se incrementa el nivel de actividad de la dotación enzimática celular, instando un esfuerzo supremo en la producción de adrenalina. Norman Winer y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Colorado en Denver, han demostrado que, en la rata sometida a un estrés agudo, se encuentra en forma activada cerca de un 50 por ciento de la tirosín-hidroxilasa, mientras que en el animal no sometido a tensión la proporción es de sólo un 5 por ciento.

De persistir el agobio, de modo que la médula suprarrenal se vea sometida a través del nervio esplácnico a un estímulo prolongado, un proceso diferente conduce a un aumento a largo plazo del ritmo de síntesis de adrenalina. Hans Thoenen, trabajando en el laboratorio de Julius Axelrod, en el Instituto Nacional de la Salud Mental (y actualmente en el Instituto Max Planck de Psiquiatría de Munich), demostró que la estimulación continuada de la célula cromafín provocaba la síntesis de un suplemento de tirosín-hidroxilasa. Acoplado con el mecanismo a corto plazo de activación enzimática, el dispositivo de adaptación a largo plazo permite que la médula suprarrenal no almacene un exceso de hormona para enfrentarse con cualquier demanda. Sabemos hoy que existen mecanismos semejantes para el control de la síntesis de noradrenalina en las neuronas simpáticas.

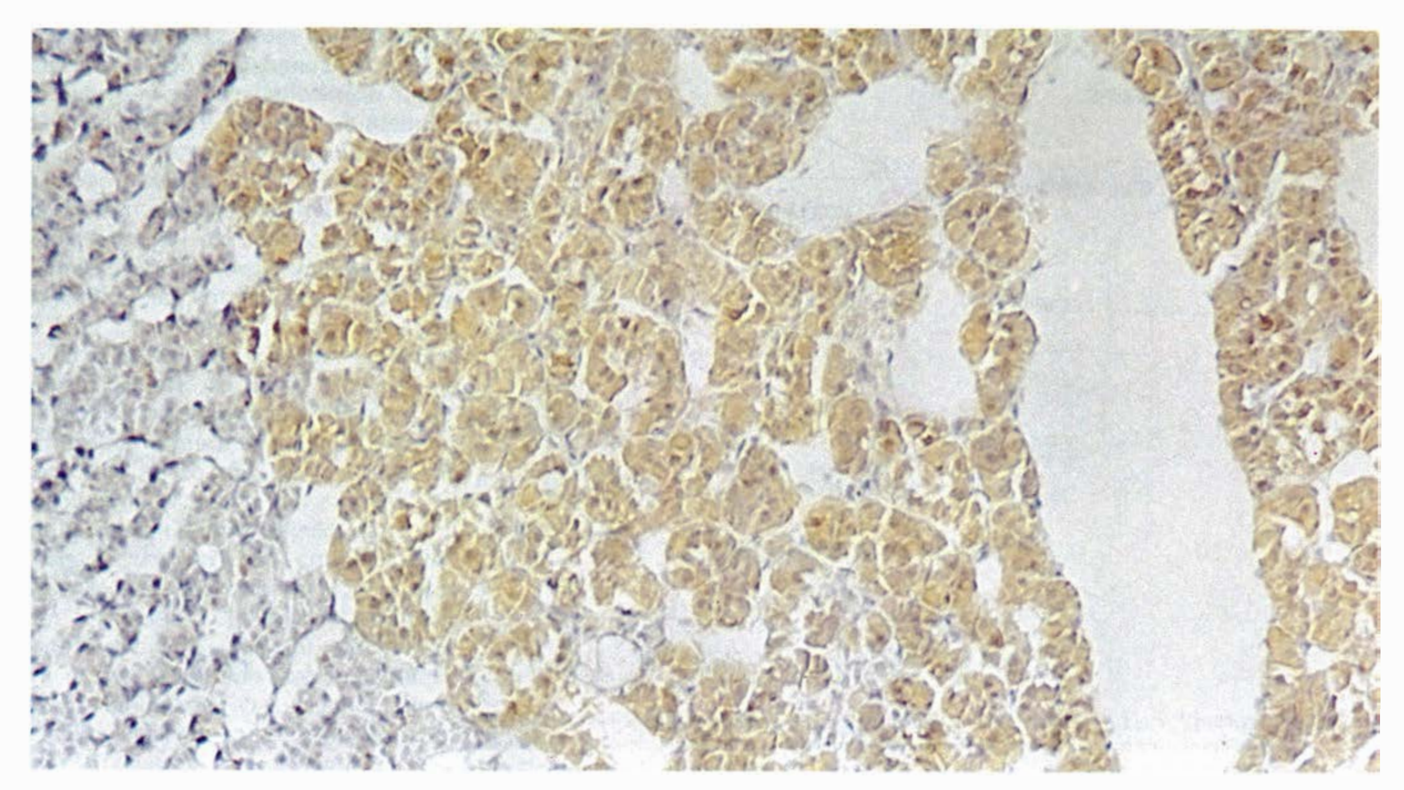
También el córtex suprarrenal ejerce una influencia bioquímica sobre la síntesis de adrenalina en la médula. Dado que el córtex envuelve la médula, la sangre que llega a ella pasa a través del córtex, de tal modo que la mayoría de las células cromafines quedan expuestas a altas concentraciones de esteroides corticales, es decir, de hormonas liberadas por el córtex. Roland Ciaranello y Dona Wong, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, han demostrado que, en ausencia de esteroides, la enzima que cataliza la conversión de noradrenalina en adrenalina se degrada a un ritmo desacostumbrado. De este modo, la íntima relación anatómica entre el córtex y la médula se prolonga hasta el nivel molecular. Es conocido el hecho de que el estrés induce la secreción de hormonas suprarrenales, tanto de la corteza como de la médula. Parece ser que las corticales aseguran el mantenimiento de la síntesis de adrenalina.

En dos momentos importantes del proceso de síntesis de la adrenalina han de acarrearse al interior de las vesículas cromafines ciertas sustancias sintetizadas en el citosol, de primordial importancia. La dopamina debe entrar en las vesículas para su conversión en noradrenalina; el producto final de la síntesis, la adrenalina, tiene que pasar también del citosol a las vesículas para su almacenamiento. En el interior de las vesículas, la concentración de adrenalina es por lo menos 25.000 veces mayor que en el citosol, hecho que atestigua la eficacia del mecanismo de transporte. ¿Cómo se efectúa el bombeo de esas hormonas a través de la membrana vesicular?

Arvid Carlsson y sus colegas, de la Universidad de Göteborg, y Norman Kirshner, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Duke, informaron en 1962 de una primera clave sobre la naturaleza del mecanismo de transporte. Comprobaron que las vesículas cromafines aisladas podían acumular y almacenar adrenalina a partir de una solución diluida. También demostraron que sólo se producía esa acumulación en presencia de iones de magnesio y del compuesto adenosín-trifosfato (ATP), el transportador celular de energía. Peter Banks, actualmente en la Universidad de Sheffield, advirtió la presencia, en la membrana vesicular, de la enzima ATPasa, que degrada el ATP cuando es activada por el magnesio; propuso que la captación de adrenalina dependía de la energía producida por la degradación del ATP mediada por la ATPasa. Sin embargo, el verdadero



2. GLANDULAS SUPRARRENALES (*A, B*), según un grabado en madera realizado en 1611 por el anatomista danés Caspar Bartholinus. La médula suprarrenal, la porción central que contiene las células cromafines, no se conocía aún como tal. Bartholinus describió las glándulas como órganos capsulados que contenían una "bilis negra". Dos siglos después, el anatomista francés Georges Cuvier estableció que la glándula suprarrenal tenía una médula maciza. Más tarde se comprobó que el líquido mencionado por Bartholinus aparecía por la rápida degradación post mortem de la médula. Las estructuras marcadas *G* en el grabado son los riñones, desproporcionadamente pequeños. El resto son vasos sanguíneos.



3. EN LA REACCION CROMAFINICA se produce una coloración pardo-amarillenta; tiene lugar al aplicarse sales de cromo al tejido suprarrenal, que provoca la oxidación de la adrenalina contenida en las células cromafines. En esta micrografía de la glándula suprarrenal de rata, la coloración marca específicamente la médula, donde se encuentran las células cromafines, en contraste con el córtex, teñido de azul y que la rodea. El espacio ovalado corresponde a la vena central, que transporta las secreciones celulares. La fotomicrografía es obra de Rex E. Coupland, de la Universidad de Nottingham.

papel de la ATPasa en ese proceso ha permanecido en la sombra durante 20 años.

A finales de la década de 1970 se esclareció el papel de la ATPasa, gracias a un elegante estudio experimental llevado a cabo por George K. Radda, David Njus y sus colaboradores, en Oxford, así como por Robert J. Johnson y Antonio Scarpa, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania. Demostraron que la ATPasa de la membrana vesicular, al degradar el ATP, desplazaba protones (hidrogeniones) del citosol al interior de las vesículas. La acumulación de esos protones produce una carga positiva en el interior vesicular, haciéndose más ácido que el citosol. Esa diferencia de carga y acidez a través de la membrana vesicular se conoce como gradiente electroquímico de protones.

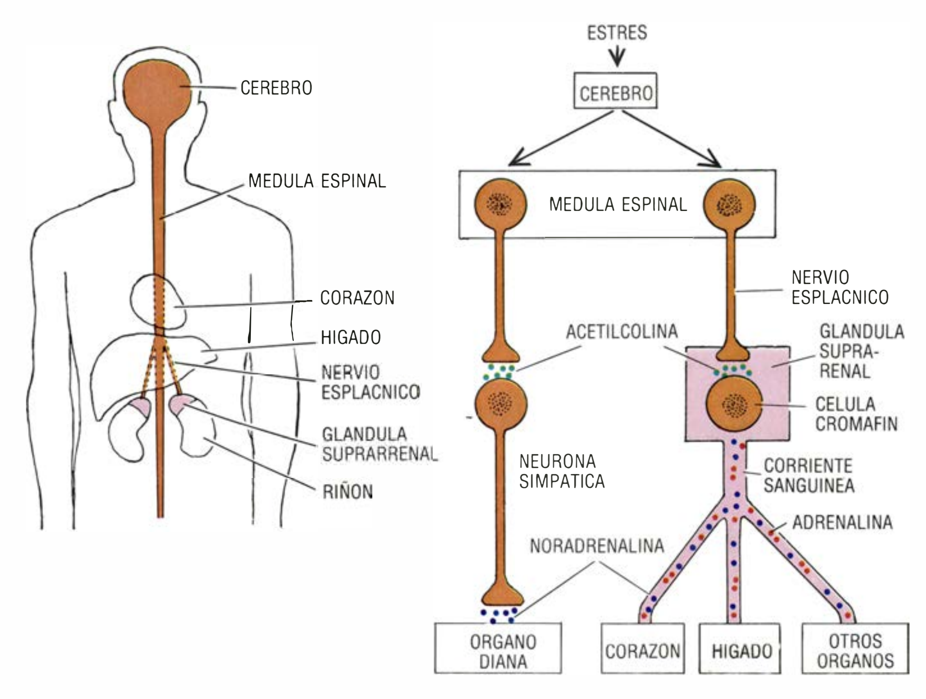
El gradiente considerado representa una energía almacenada, que impulsa la captación de catecolaminas (grupo que comprende las adrenalina, noradrenalina y dopamina), a la vez que refluyen protones a favor del gradiente, hacia el citoplasma. El mecanismo preciso mediante el cual controla el gradiente este proceso de transporte queda todavía por determinar.

Está claro que las hormonas encauzadas hacia el interior de las vesículas han de combinarse con una proteína transportadora especial. Shimon Schuldiner y Ruth Gabizon, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, estudiaron recientemente el problema mediante marcaje radiactivo de una molécula de sonda, funcionalmente emparentada con las catecolaminas. La sonda se unió a una proteína de la membrana vesicular, todavía no caracterizada en detalle, que presumiblemente sea la proteína de transporte.

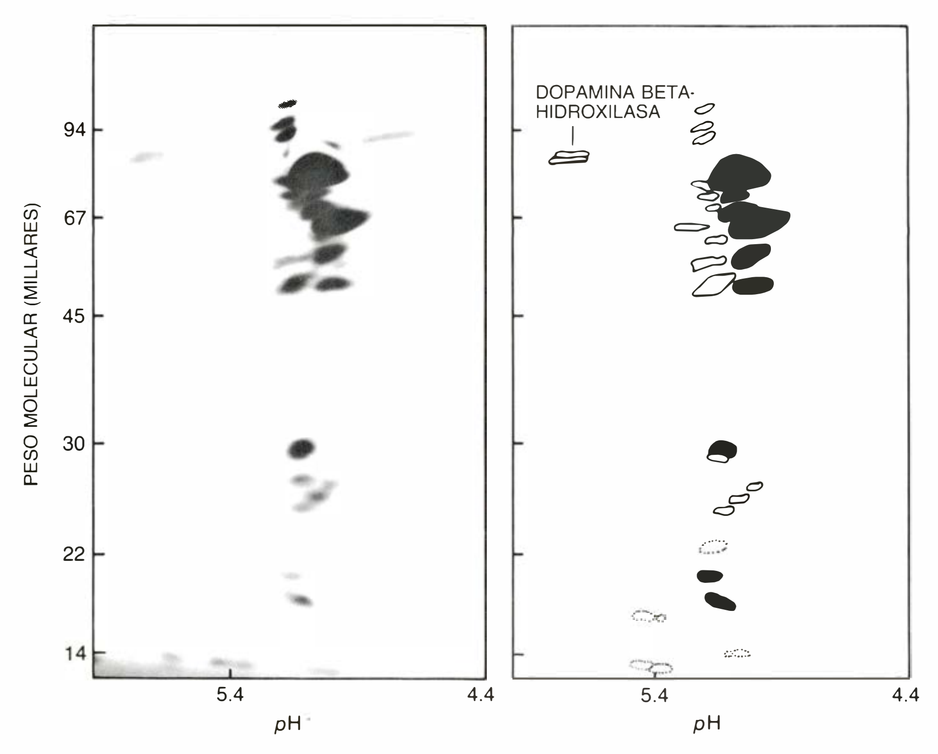
El transporte de las catecolaminas al interior de las vesículas cromafines constituyó el primer ejemplo de proceso regulado por un gradiente de protones en un orgánulo de célula animal que no fuera las mitocondrias. En éstas lo describió en 1961 Peter Mitchell, del Instituto de Investigación Glynn, Inglaterra, con el apelativo de mecanismo quimiosmótico. En las mitocondrias, la oxidación del piruvato (procedente de la degradación de la glucosa) y de otras sustancias genera un gradiente protónico, que a su vez impulsa la síntesis de ATP. En las vesículas cromafines, la relación entre ATP y gradiente protónico suele ser inversa; el gradiente, en vez de impulsar la síntesis de ATP, tiene que mantenerse por medio de su degradación. (Sin embargo, Jean-Pierre Henry y Daniel Saherman, del Instituto de Biología Físico-Química de París, así como Gabriele Taugner, del Instituto Max Planck para Investigación Médica de Heidelberg, han demostrado que, cuando se establece artificialmente un gradiente protónico en la membrana vesicular, el escape de protones puede conducir a la síntesis de ATP.)

Las enzimas ATPasa, decisivas para los gradientes protónicos de la vesícula cromafín, están compuestas por subunidades de proteínas que son diferentes de las que operan en la micocondria. Así ha sido demostrado por David K. Apps, trabajando en Edimburgo, y Nathan Nelson y Shulamit Cidon, del Instituto de Tecnología Technion-Israel. Las enzimas, en ambos casos, tienen una estructura bipartita semejante: un componente, en la superficie de la membrana, que participa en la síntesis o en la degradación del ATP; y otro componente que sirve de conductor de los protones a través de la membrana.

El mecanismo de captación descrito para las catecolaminas parece ser común a numerosas células secretoras. Así, por ejemplo, un gradiente protónico concentra serotonina, una sustancia liberada durante la coagulación de la sangre, en el almacenaje vesicular de las plaquetas. Cierto número de inves-



4. UN ESTRES PROVOCA LA SECRECION tanto por parte de las células cromafines de las glándulas suprarrenales colocadas justamente encima de los riñones (*izquierda*), como por parte de las neuronas simpáticas, que se infiltran en una serie de tejidos y órganos. Los impulsos llegan a ambas estirpes celulares por intermedio de nervios que salen de la médula espinal (*derecha*). Las células cromafines secretan adrenalina, noradrenalina y otras sustancias hacia el torrente sanguíneo, ejerciendo con ello un control muy disperso sobre tejidos y órganos. Las neuronas simpáticas descargan noradrenalina localmente. Dadas las semejanzas en la activación de células cromafines y neuronas simpáticas, en sus secreciones y en sus efectos, así como su desarrollo a partir de un tronco común de células embrionarias (en la cresta neural), la médula suprarrenal se considera una parte componente del sistema nervioso simpático.



5. PROTEINAS DE LA VESICULA CROMAFIN separadas por electroforesis bidimensional en gel, técnica en la que las proteínas se embeben en un gel y se separan según su carga eléctrica (expresada aquí como *p*H) y por su tamaño molecular (aquí expresado en millares de peso molecular). La imagen de la izquierda muestra el gel después de la aplicación de un colorante que revela las posiciones de las proteínas. Se aplicaron a continuación anticuerpos contra proteínas específicas para clasificar el contenido de las vesículas en grupos de proteínas, esquemáticamente indicadas a la derecha: cromogranina *A* (*manchas negras*), cromograninas *B* (*contornos*), precursores de encefalina (*contornos discontinuos*) y la dopamino-beta-hidroxilasa. El análisis lo verificó Reiner Fischer-Colbrie, de la Universidad de Innsbruck.

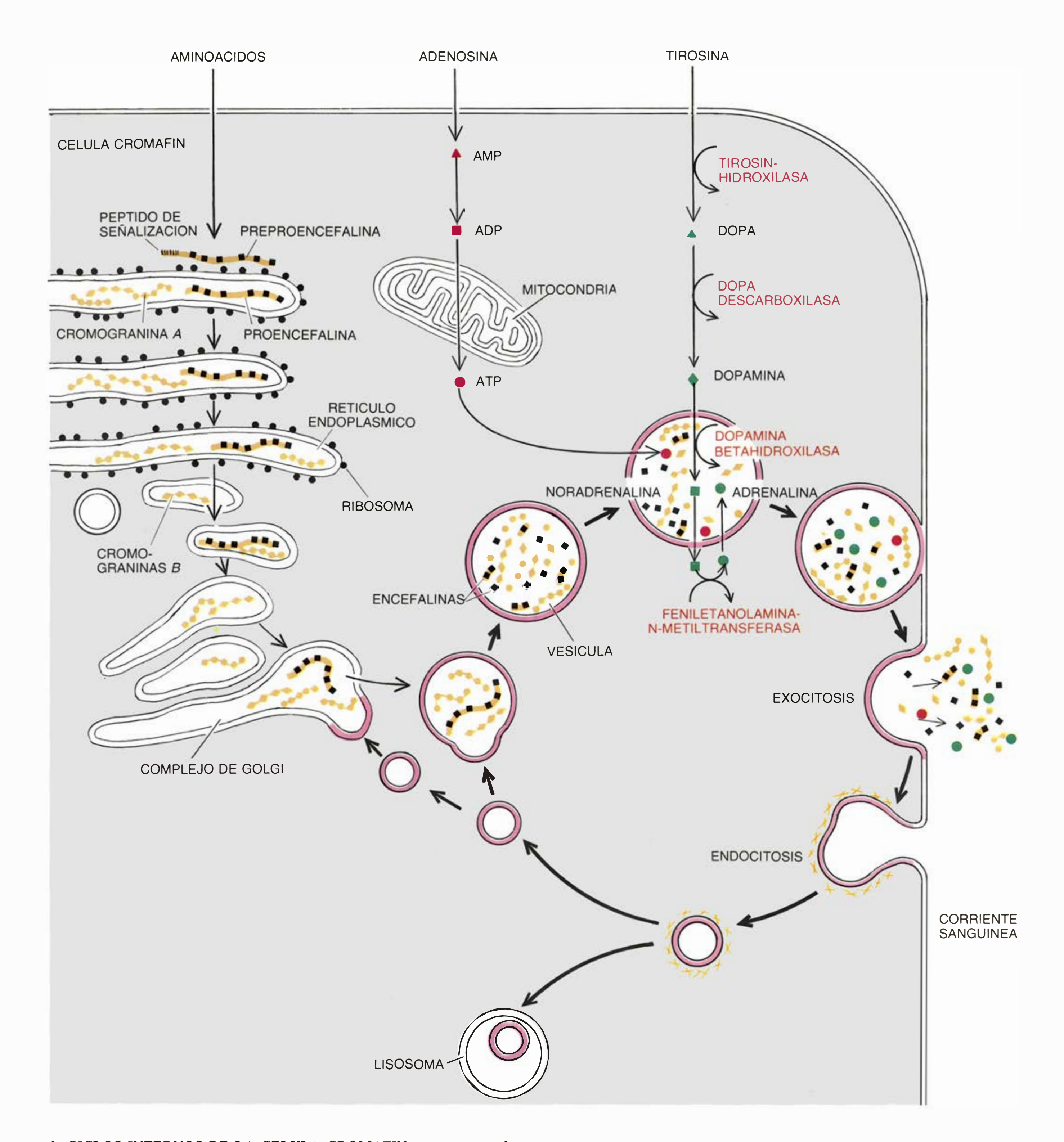
tigadores han establecido recientemente que la acumulación del neurotransmisor acetilcolina en las vesículas sinápticas de neuronas depende también de un gradiente de protones.

En colaboración con nuestros colegas de la Universidad de Innsbruck, hemos demostrado un segundo papel para el gradiente protónico de la célula cromafín. La concentración de ATP en las vesículas cromafines es, por lo menos, 30 veces mayor que en el citosol. Nuestro grupo ha establecido que el gradiente electroquímico, acoplado con una proteína de transporte distinta, lleva ATP al interior de las vesículas. Los trabajos de Edward W. Westhead, Jr., y sus colegas, en la Universidad de Massachusetts en Amherst, sugiere que, dentro de las vesículas, el ATP mantiene la estabilidad osmótica. Ordinariamente, una solución concentrada, separada de otra diluida por una membrana, toma agua de esta última por ósmosis. Dentro de las vesículas cromafines, las catecolaminas forman una solución muy concentrada; sin control, la ósmosis rompería las vesículas. La interacción del ATP con las catecolaminas rebaja la concentración efectiva e impide la ruptura.

Las vesículas cromafines no sólo almacenan catecolaminas y ATP, sino también una mezcla diversa de proteínas que pueden ejercer una amplia actividad sobre el sistema nervioso y otros órganos. La presencia de proteínas en las vesículas la reconoció Hillarp en la década de 1950; la técnica de electroforesis bidimensional en gel ha permitido luego la separación de proteínas según su tamaño molecular y su carga eléctrica, facilitando la identificación de por lo menos 30 componentes de las proteínas investigadas. El más abundante es la proteína ácida denominada cromogranina *A*.

Aunque aislada y caracterizada la proteína, permanece oscura la función de la cromagranina *A*, y aún se estudia su distribución. Se pensó en principio que estaba confinada a la médula suprarrenal y los nervios simpáticos. Una colaboración entre grupos coordinados por David Cohn, del Centro Médico de la Administración de Veteranos en Kansas City, y por uno de nosotros (Winkler) reveló la existencia en la glándula paratiroides de una proteína similar, si no idéntica, a la cromogranina *A;* se la ha encontrado en otros tejidos endocrinos y en el cerebro.

Al margen de otros problemas que plantea esa sustancia, lo cierto es que



6. CICLOS INTERNOS DE LA CELULA CROMAFIN, que comprenden las rutas bioquímicas necesarias para sintetizar el contenido de las vesículas cromafines, así como el ciclo físico en el que cada vesícula se vacía y se recupera su membrana para una subsiguiente utilización. La adrenalina, producto secretorio primario de la mayoría de las vesículas, se sintetiza a partir de la tirosina en cuatro tiempos, cada uno catalizado por una enzima distinta. Penetra la tirosina en la célula, se transforma en dopa y luego en dopamina. Esta última pasa al interior de las vesículas cromafines, donde se transforma en noradrenalina, que luego sale de las vesículas al citosol, donde se convierte en adrenalina. Esta última retorna por bombeo a las vesículas, para su almacenamiento. La segunda sustancia almacenada es el adenosín-trifosfato (ATP), que se sintetiza a partir de la adenosina, convertida primeramente en adenosín-monofosfato (AMP) y luego en adenosín-difosfato (ADP). Este último ingresa en la mitocondria y se convierte en ATP. Los aminoácidos sirven de material de partida para la manufactura de precursores de encefalina (neuropéptido de acción analgésica) y cromogranínas, *A* y *B*. La preproencefalina, un polipéptido de cadena larga que contiene secuencias de encefalina, se sintetiza en ribosomas adosados a lo largo del retículo endoplásmico. Conforme va pasando al interior del retículo se desprende de un breve péptido de señalización; la molécula así amputada (conocida ahora como proencefalina) se desplaza hacia el complejo de Golgi y queda almacenada en vesículas cromafines recién formadas. En ellas tiene lugar una fragmentación en moléculas más pequeñas, incluidas algunas encefalinas libres. Las cromogranínas también se sintetizan bajo forma de grandes proproteínas, que más tarde se fragmentan. Las propias vesículas están sometidas a un ciclo de exocitosis y endocitosis (*flechas negras gruesas*). Durante la exocitosis se desplazan hacia la superficie celular, se fusionan con la membrana plasmática y descargan su contenido. La membrana vesicular se provee de un "revestimiento" velloso, que es un signo de inminente endocitosis. Se desprende de la membrana superficial y vuelve a la región de Golgi, donde la membrana se recicla para fabricar nuevas vesículas cromafines. Algunas de las membranas recuperadas no completan el ciclo y se desintegran en orgánulos digestivos, los lisosomas.

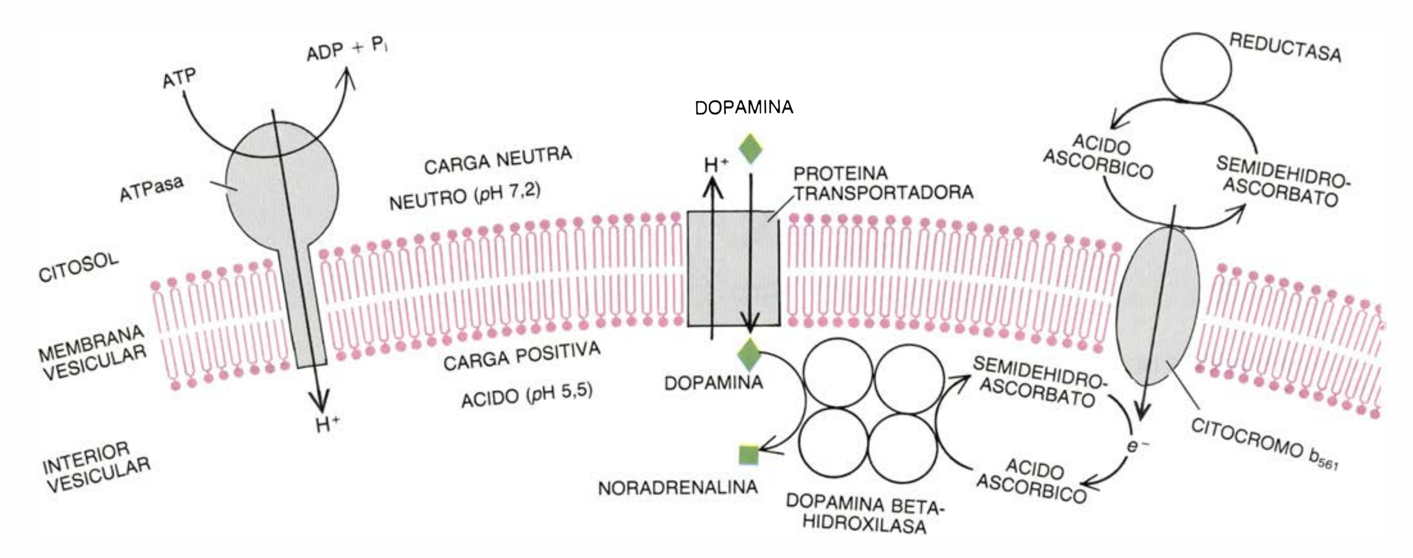
su producción en el seno de la célula cromafín está bien establecida. Se sintetiza en el retículo endoplásmico, la estructura subcelular responsable de la síntesis proteica en general, en forma de proproteína, es decir, de precursor de otras proteínas. De él pasa al aparato de Golgi, el orgánulo del que derivan contenedores intracelulares, como las propias vesículas cromafines; en ellos se almacena el producto y la proproteína se escinde, por obra de enzimas proteolíticas, liberando moléculas de menor tamaño.

Las características de la cromogranina *A* (su amplia distribución en tejidos endocrinos y nerviosos y su origen por un proceso proteolítico) son comunes a un grupo de proteínas emparentadas, aunque menos abundantes, recientemente caracterizadas por Reiner Fischer-Colbrie, de Innsbruck: las cromograninas *B*. También participan de estas características los neuropéptidos, breves cadenas de aminoácidos; algunos de ellos actúan doblemente, bien como neurotransmisores, cuando los libera una neurona, o como hormonas, cuando los secretan las glándulas endocrinas. Se han convertido en centro de la máxima atención, dados sus múltiples efectos, extraordinariamente variados y complejos, como la regulación de la presión sanguínea, la supresión del dolor y el control de la conducta [véase "Neuropéptidos", por Floyd E. Bloom; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1981].

La apasionante historia de los neuropéptidos de la médula suprarrenal comenzó en 1978, al descubrirlos en este tejido Mariane Schultzberg y Tomas G.M. Hökfelt y sus colegas, del Instituto Carolino. Se valieron estos investigadores de técnicas inmunohistoquímicas, en las que se aplica un anticuerpo frente a una molécula determinada para precisar la distribución de esta última por los tejidos. Demostraron que la médula suprarrenal contenía un material semejante a las encefalinas, grupo de moléculas neuropeptídicas de cinco aminoácidos, previamente identificadas en el cerebro, donde ejercen efectos analgésicos. Poco después, O. Humberto Viveros y colaboradores, de los Laboratorios de Investigación Wellcome, así como otros grupos, establecieron que las encefalinas de la médula suprarrenal se almacenaban en vesículas cromafines. Al paso que estudiaban estas encefalinas, Sidney Udenfriend, del Instituto Roche de Biología Molecular, así como Jean Rossier, del Laboratorio de Fisiología Nerviosa del CNRS en Gif-sur-Yvette, y sus colegas encontraron también péptidos de cadena más larga, supuestos precursores de las encefalinas.

Investigaciones posteriores descubrieron el mecanismo de producción de estas encefalinas en la célula cromafín. Valiéndose de técnicas de clonación molecular, Michael Comb, de la Universidad de Oregon, Ueli Gubler, del Instituto Roche, y Masaharu Noda y Shosaku Numa, de la Universidad de Kyoto, comprobaron la presencia en la médula suprarrenal de una proteína inicial, la preproencefalina, de 267 aminoácidos, que contiene siete secuencias de encefalina. La tal proteína ingresa en el retículo endoplásmico conforme se va sintetizando; luego se transforma en proencefalina por sustracción de un péptido inicial que sirvió en su momento para la entrada de la proteína en el retículo. La proencefalina se desplaza entonces a la región golgiana, quedando finalmente encerrada en las vesículas cromafines; en estas últimas, ciertas enzimas proteolíticas liberan las encefalinas.

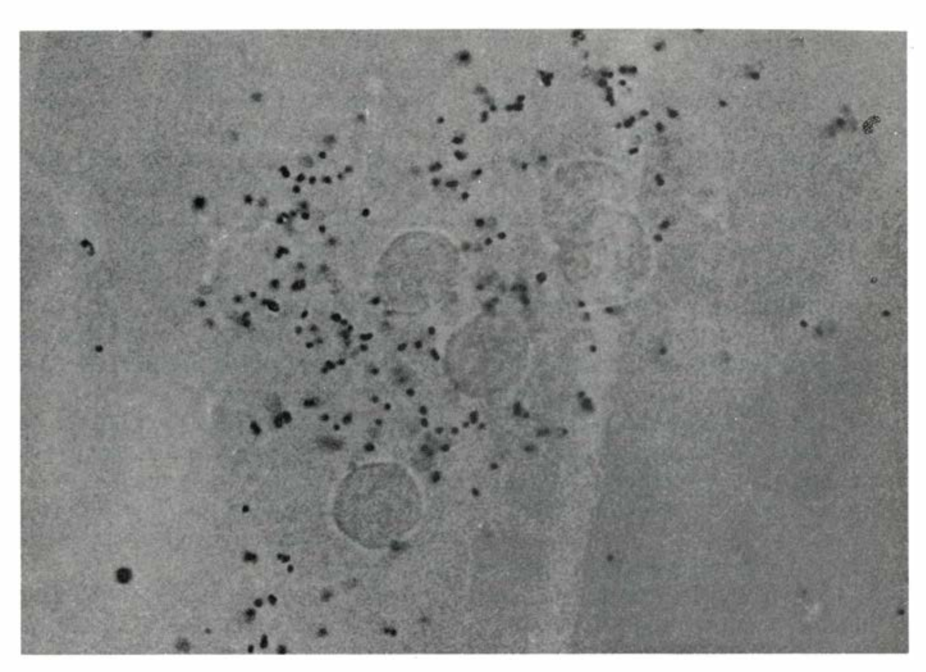
En paralelo con el ritmo de síntesis de las catecolaminas, la tasa de producción de encefalinas por parte de las células cromafines es variable. Cuando se aíslan de la glándula suprarrenal de la vaca y se estimulan artificialmente, el nivel de actividad encefalina se incrementa al mismo tiempo que el de las catecolaminas. Lee E. Eiden y Erminio Costa, con sus colaboradores, ambos por separado, trabajando en el Instituto Nacional de la Salud Mental de los Estados Unidos, han demostrado que la estimulación incrementa la cantidad de ARN mensajero que determina la preproencefalina. La estimulación de la célula cromafín en la rata tiene, sin embargo, un efecto opuesto, según demostraron Ira Black y sus colegas, de la Universidad de Cornell. El contenido



7. PUENTES DE PROTEINA transportan catecolaminas, protones y electrones a través de la membrana de la vesícula cromafín. La enzima ATPasa degrada en el citosol el ATP, rindiendo ADP y fosfato inorgánico (P_i), y liberándose energía que bombea protones (H^+) al interior de la vesícula a través de su membrana. Se crea así un gradiente protónico: desciende el *p*H del interior y la vesícula adquiere carga positiva. La energía almacenada en el gradiente controla el transporte de catecolaminas, como la dopamina, hacia el interior vesicular. Paralelamente al reflujo de protones hacia el citosol, una proteína de transporte introduce la dopamina en la vesícula. La transformación de dopamina en noradrenalina se produce también dentro de la vesícula. Está catalizada por una enzima cuatripartita, la dopamín-beta-hidroxilasa, con el ácido ascórbico como cofactor. En este proceso, el ácido ascórbico pierde un electrón y pasa a semidehidroascorbato. Una tercera proteína de la membrana vesicular, el citocromo b_{561}, transfiere electrones hacia las vesículas, a partir de un proceso complementario que se produce en el citosol, con lo cual se renueva el ácido ascórbico y se asegura la síntesis de noradrenalina.

de encefalina disminuye drásticamente en este caso, coincidiendo con un aumento de la síntesis de catecolaminas.

Aunque conozcamos bastante acerca de la síntesis de neuropéptidos en la glándula suprarrenal y, por extensión, en otros tejidos, estamos lejos de comprender el modo de actuar de esas sustancias tras su liberación. James Lewis y John C. Libeskind y sus colaboradores, de la Universidad de California en Los Angeles, han demostrado que los productos secretados por la médula suprarrenal pueden procurar cierta analgesia durante el estrés, un efecto probablemente debido a las encefalinas. En conjunto, sin embargo, la presencia de neuropéptidos de variadas magnitudes moleculares dentro del "cocktail" de sustancias almacenadas en la médula suprarrenal sigue sin hallar explicación. De aclararse por qué la médula produce esa compleja mezcla de sustancias quizá se explique la secreción de mezclas semejantes por parte de otras glándulas endocrinas y los nervios.

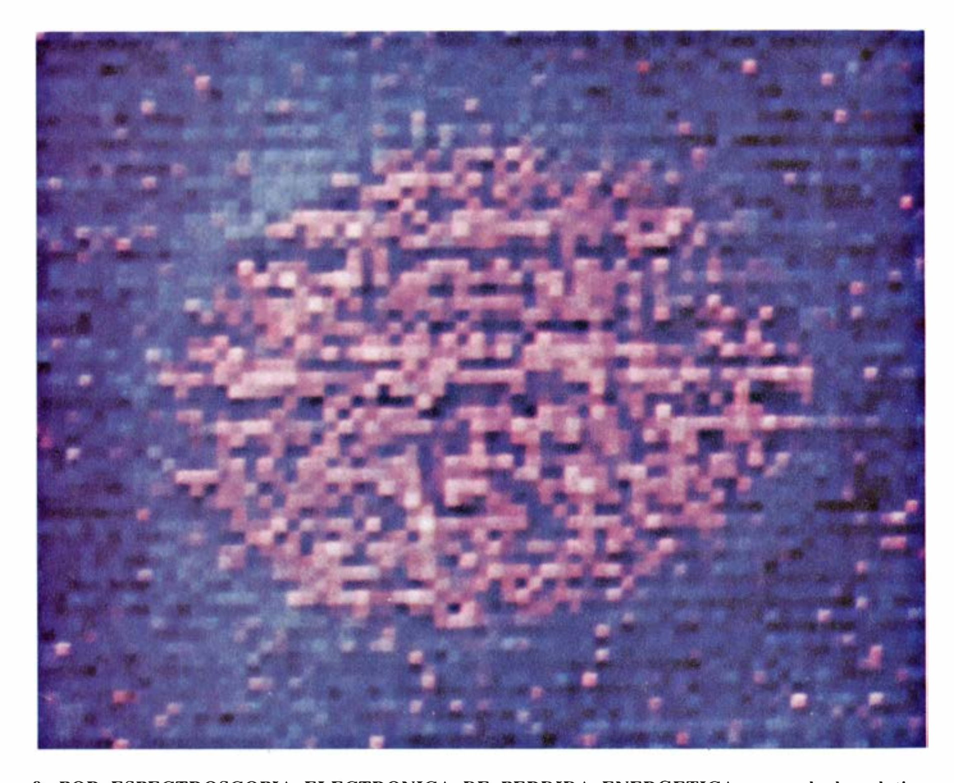


8. MENSAJE DE LA PREPROENCEFALINA en células cromafines bovinas, cultivadas y estimuladas artificialmente, según Ruth E. Siegel, del Instituto Nacional de la Salud Mental, de los Estados Unidos, quien se valió de la técnica histoquímica de hibridación in situ. Preparó y marcó con un isótopo radiactivo una secuencia de ADN complementaria del ARN mensajero (ARNm) que determina la preproencefalina. Al introducirse el ADN complementario (ADNc) en las células cromafines hibridó con el (se unió al) ARNm. Se recubrió entonces las células con una emulsión fotográfica para obtener una autorradiografía, en la que los puntos negros revelan la localización del ADNc radiactivo unido al ARNm. (Algunos puntos negros quedan fuera de las células debido a que las partículas radiactivas las abandonan antes de combinarse con la emulsión.) La imagen muestra una concentración unas tres veces mayor de puntos negros que en las imágenes de células no estimuladas. Estos resultados sugieren que el aumento en la síntesis de preproencefalina por parte de las células cromafines responde a un aumento del ARNm.

La célula cromafín no sólo almacena mezclados sus productos característicos, sino que también los libera así. En la década de 1970 se descubrió que la médula suprarrenal secretaba cromograninas junto con otras macromoléculas, al tiempo de liberar la adrenalina. Eso sugirió que el proceso de secreción se efectuaba mediante exocitosis, mecanismo en el cual una vesícula se desplaza hacia la superficie celular, se fusionan las dos membranas, plasmática celular y vesicular, para finalmente abrirse la vesícula al exterior pericelular. El contenido entero de la vesícula se vacía, por tanto, al espacio extracelular.

Las primeras micrografías electrónicas que evidenciaron morfológicamente la exocitosis las obtuvo en la glándula suprarrenal del hámster Odile Grynszpan-Winograd (Diner, de soltera), de la Universidad de París. Se observaron vesículas cromafines abriéndose directamente al espacio extracelular, previa fusión con la membrana plasmática. Desde entonces se admite que ése es el mecanismo primario de liberación de todos los neurotransmisores y hormonas, salvo los esteroides secretados por el córtex suprarrenal y las gónadas.

La exocitosis de vesículas constituye un elegante y eficaz método de vaciado. Libera compuestos al exterior de la célula en una concentración muy superior a la que se alcanzaría si se secretaran a partir del citosol, al tiempo que hace innecesario cualquier mecanismo



9. POR ESPECTROSCOPIA ELECTRONICA DE PERDIDA ENERGETICA se revela la relativa abundancia de elementos en una vesícula cromafín y en el citosol circundante. La técnica detecta variaciones en la pérdida energética de los electrones que atraviesan la muestra observada al microscopio electrónico, a partir de las cuales se elabora un mapa de distribución de elementos en el tejido. En esta imagen generada por ordenador, el nitrógeno aparece en rosa y el carbono en azul. La difusión del rosa en la vesícula refleja su alta concentración en sustancias nitrogenadas, como adrenalina, noradrenalina, dopamina y ATP. El halo azul que rodea la vesícula cromafín probablemente responda al contenido relativamente alto de carbono de la membrana. La imagen, de 300.000 diámetros de aumento, la tomaron Richard Ornberg y Richard D. Leapman, del Instituto Nacional de la Salud de los Estados Unidos.

especializado para el transporte de macromoléculas a través de la membrana intacta; también faculta a la célula para desprenderse de un acúmulo de sustancias diversas, como si se hubiera roto la membrana, pero sin pérdida de citosol. Uno de nosotros (Winkler) ha calculado recientemente que, cuando la vesícula cromafín se funde con la membrana plasmática, en la médula suprarrenal de la vaca, se liberan unos tres millones de moléculas de catecolaminas, 800.000 de compuestos nucleotídicos, como el ATP, 5000 moléculas de cromogranina *A*, 80 de cromograninas *B* y varios miles de moléculas precursoras de encefalinas y de encefalinas libres.

¿Cómo se desencadena la exocitosis en la célula cromafín? Cuando un impulso nervioso excita las neuronas que inervan la médula suprarrenal se libera acetilcolina con funciones de neurotransmisor. La acetilcolina reacciona con los receptores de las células cromafines, poniendo en marcha un proceso en el que los canales para el calcio (poros moleculares de la membrana celular) se abren y facilitan el aumento de esos iones en el interior de las células, produciéndose la secreción.

No se sabe exactamente por qué ese aumento del calcio intracelular provoca la secreción por exocitosis. Un primer paso en el estudio de esta cuestión fue el de disociar los fenómenos asociados al influjo de los iones calcio de los efectos del calcio dentro de las células cromafines. Resultó factible dar el paso cuando Bruce G. Livett y sus colegas, de la Universidad de Melbourne, diseñaron técnicas de aislamiento de células cromafines. Perforando la membrana celular se consiguió modificar la concentración del calcio intracelular, sin apertura alguna de los poros o canales de la membrana en cuestión. Peter F. Baker y Derek E. Knight, del King's College de Londres, provocaron una destrucción selectiva de la membrana utilizando campos eléctricos breves e intensos. Jack Brooks, de la Universidad Marquette, Ronald W. Holz, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Michigan, así como otros, descubrieron que el empleo de detergentes lograba la producción de agujeros de diámetro algo mayor. La membrana perforada resultaba permeable a los iones y, añadiendo calcio al líquido que bañaba las células, aumentaba el calcio intracelular.

Todas estas técnicas permitieron constatar que, para que se produjera exocitosis, en la solución de baño no sólo debía haber calcio, sino también ATP y magnesio. Es probable que la ATPasa activada por el magnesio degrade el ATP y proporcione la energía necesaria para la exocitosis. Está claro, por otro lado, que el efecto del calcio se ejerce en el interior celular. ¿Qué reacciones le hacen precipitar la exocitosis?

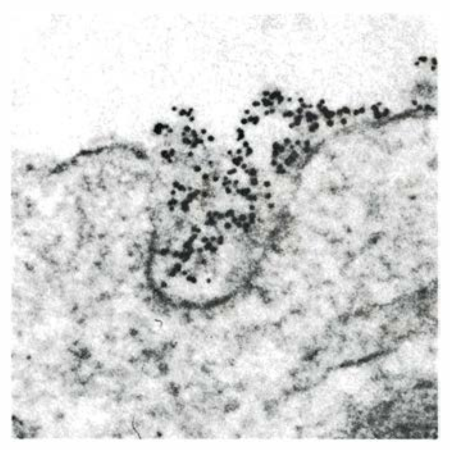
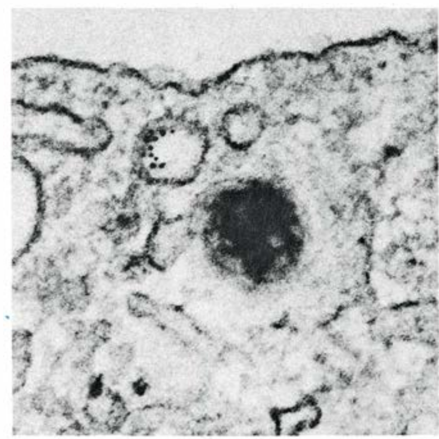
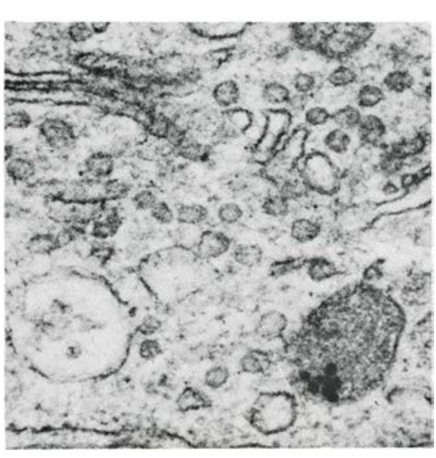
Como la mayoría de las células, las cromafines poseen citoesqueleto, una red interna de microtúbulos y microfilamentos constituidos por proteínas estructurales y contráctiles. En un principio se pensó que, en presencia de calcio y posiblemente de ATP, la malla de proteínas tiraba de las vesículas hacia el borde de la célula, permitiendo su fusión con la membrana plasmática. Esta hipótesis, sin embargo, no parece verosímil. Dominique Aunis y sus colegas, del Instituto Nacional para la Salud e Investigación Médica de Estrasburgo, han propuesto recientemente que, en presencia de calcio, la malla del citoesqueleto deja sueltas las vesículas, permitiendo su desplazamiento hacia la membrana plasmática. En hallazgo relacionado con la cuestión, Velia M. Fowler y Harvey B. Pollard, del Instituto Nacional de la Artritis, Diabetes y Enfermedades Digestivas y Renales, demostraron que el calcio rebaja la viscosidad de las soluciones que contienen vesículas y proteínas contráctiles, como las del citoesqueleto. La concentración de calcio requerida era comparable al nivel medio en la célula cromafín durante la secreción.

Una vez las vesículas han alcanzado la superficie celular, resulta presumible que otras proteínas intervengan en su fusión con la membrana plasmática. Pollard y Carl E. Creutz y sus colegas comprobaron que las vesículas cromafines aisladas de la célula se fusionaban al añadir al medio calcio y proteínas extraídas del citoplasma. Aislaron una de las proteínas, particularmente eficaz a la hora de promover la fusión, que llamaron sinexina (del griego "asamblea"); se han identificado luego otras sinexinas, pero su papel en la exocitosis es incierto: la fusión de las vesículas cromafines in vitro quizá no constituya un modelo válido de lo que acontece in vivo. Se han identificado también otras proteínas que se unen a las vesículas en presencia de calcio, bautizándoselas cromobindinas. Su significación en la exocitosis es asimismo incierta.

Por aplicación de técnicas inmunológicas quizá llegue a establecerse el papel de estas u otras proteínas en el proceso de la exocitosis. Al efecto se introduce un anticuerpo en una célula cromafín, donde liga y neutraliza una proteína específica. Determinando entonces el punto de interrupción de la exocitosis, podrá definirse la función precisa de la proteína neutralizada. Si se marca el anticuerpo con un colorante fluorescente o con pequeñas partículas de oro, visibles al microscopio electrónico, se podrá reconocer la distribución de la proteína dentro de la célula cromafín.

No resulta sencillo introducir una sonda inmunológica de tal índole en el interior de la célula cromafín. José M. Trifaró y sus colegas, de la Universidad de McGill, han ideado una solución al problema, y sus resultados resaltan la importancia del calcio en la exocitosis. Rompieron hematíes y los dejaron recomponerse en un medio con anticuer-

10. SE PRODUCE EXOCITOSIS cuando la membrana de una vesícula cromafín se fusiona con la membrana superficial de la célula, abriéndose la vesícula al exterior y descargando su contenido de hormonas y otras sustancias. Se muestra aquí la exocitosis de una vesícula a un aumento de 40.000 diámetros, en una micrografía electrónica convencional (*izquierda*), obra de Odile Grynszpan-Winograd, y en otra de criofractura (*derecha*), de Wolfgang Schmidt. La membrana vesicular se recupera por endocitosis.

11. RECICLAJE DE LA MEMBRANA. Lo plasman estas micrografías de Alexandra Patzak, de la Universidad de Innsbruck. La fotomicrografía superior muestra, a 5150 diámetros de aumento, la superficie de la membrana de una célula secretora estimulada y tratada con un anticuerpo fluorescente contra una proteína específica de la superficie interna de vesículas cromafines. Pequeñas áreas de la membrana desarrollan un brillo azulado, señal de que se trata de parcelas de membrana vesicular que han sido incorporadas a la membrana superficial celular por exocitosis. Un marcaje del anticuerpo con partículas de oro coloidal densas a los electrones permite reseguir el reciclaje de tales parcelas de membrana en las demás micrografías. En primer lugar, la membrana vesicular, decorada con anticuerpos marcados con oro (*puntos negros*), adquiere un revestimiento y muestra una depresión (*arriba, derecha*) que luego se convierte en vesícula endocitótica. En esa vesícula destaca el marcaje de la membrana (*abajo, izquierda*). Una micrografía tomada en otro experimento permite completar el ciclo: la membrana que perteneció a una vesícula aparece en un orgánulo que, se diría, constituye una nueva vesícula cromafín (*abajo, derecha*). El aumento de las dos primeras micrografías es de 104.000 diámetros; el de la última, 58.900.

pos contra la calmodulina, una proteína de importancia crucial para la acción de los iones calcio dentro de las células. Los hematíes se transformaron, efectivamente, en contenedores de anticuerpo. Los investigadores introdujeron entonces la anticalmodulina en células cromafines, fusionando con ellas los hematíes. Se observó entonces una inhibición de la secreción de la exocitosis por parte de las células cromafines, indicio del papel directo de la calmodulina, y por tanto del calcio, en la exocitosis.

La liberación de una hormona, o de un neurotransmisor, por exocitosis pudiera constituir un problema mecánico. Cuando se descarga una vesícula de su contenido, su membrana queda incorporada a la membrana superficial. Según va produciéndose la secreción, las membranas vesiculares se van añadiendo a la superficie celular y, lógicamente, tendría que aumentar ésta hasta un tamaño imposible. No obstante, las células cromafines mantienen su tamaño invariable durante la secreción.

Se sospechaba desde hace tiempo que parte del exceso de membrana superficial se reintegra al interior de la célula. Eric Holzman y sus colegas, de la Universidad de Columbia, así como William W. Douglas y los suyos, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, demostraron que tiene lugar, efectivamente, una recuperación de tal tipo. Introdujeron trazadores en el medio que rodea a las células cromafines y detectaron luego esos trazadores en el medio intracelular. Concluyeron, pues, que la célula cromafín retiraba el exceso de membrana por endocitosis, un mecanismo inverso a la exocitosis: parte de la membrana superficial se hunde como una bolsita y se desprende formando la vesícula endocitótica, pasando al interior y transportando una porción de medio extracelular.

Desde entonces, Ervin Neher y Alain Marty, del Instituto Max Planck de Química Biofísica de Göttingen, y sus colegas han adaptado la técnica electrofisiológica de grapado para detectar fenómenos aislados de endocitosis y de exocitosis. Se aplica, adherida a la célula, una micropipeta llena de un líquido conductor eléctrico, formando un cierre eléctrico hermético. De este modo, pueden medirse las variaciones eléctricas en el área grapada por la pipeta y, al mismo tiempo, cabe romper la membrana en dicha área, registrando las variaciones que sufra el resto de la membrana celular. Esta técnica es sensible a variaciones diminutas de la capacitancia eléctrica de la membrana plasmática, del orden de 10^{-15} farad. Bajo ciertas condiciones, los cambios eléctricos pueden asociarse a la adición o sustracción de pequeñas porciones de membrana, más o menos equivalentes a la de una vesícula cromafín.

Quedaban dos cuestiones por resolver: ¿recupera la endocitosis la misma membrana que, antes de la apertura, perteneció a la vesícula, en lugar de procurarse cualquier otra área equivalente de membrana plasmática? Si lo primero es el caso, ¿cuál es la duración del ciclo completo, exocitosis más subsiguiente endocitosis? Para responder a estas cuestiones, varios grupos, incluido el nuestro de Innsbruck, trataron células cromafines con anticuerpos frente a proteínas conocidas, que habían de unirse a la superficie interna de las membranas vesiculares. Se marcaron los anticuerpos con colorantes fluorescentes, a fin de identificar cada membrana inmediatamente después de la exocitosis. Tras la estimulación de las células cromafines aisladas, las membranas vesiculares marcadas aparecen como manchitas discretas en la membrana plasmática, señal de que ha tenido lugar la exocitosis. Una vez interrumpida la estimulación, las manchitas fluorescentes desaparecen de la superficie celular, pasando al interior por endocitosis. El proceso de recuperación se completa en 30 minutos.

Para determinar el destino de las membranas vesiculares después de su recuperación, necesitábamos una sonda inmunológica que pudiera analizarse en el nivel de orgánulo bajo el microscopio electrónico. En vez de anticuerpos fluorescentes utilizamos anti-

cuerpos cargados con partículas de oro, densas a los electrones, que marcan las membranas vesiculares durante su exposición en la superficie celular. Las áreas marcadas toman primero un aspecto velloso característico, como de "hoyos revestidos" de la membrana celular próximos a emprender la endocitosis. Las depresiones marcadas forman bolsas que acaban por desprenderse para constituir vesículas endocitóticas en el interior celular. En última instancia, la membrana vesicular pierde su revestimiento. Algunas pueden verse más tarde en el aparato de Golgi, junto a vesículas recién formadas con las que finalmente se confunden.

En estudios previos de varias glándulas, realizados por Marilyn Farquhar, en Yale, Volker Herzog, de la Universidad de Munich, y Berton C. Pressman y Robert W. Rubin, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Miami, se emplearon marcadores para demostrar que la membrana se reciclaba entre la región de Golgi y la superficie celular. El empleo de anticuerpos específicos ha permitido establecer que, en la célula cromafín, la membrana de la vesícula de secreción se recicla mediante formación vesicular, exocitosis y endocitosis. ¿Acaso no resulta una estrategia elegante utilizar la membrana vesicular como recipiente reciclable?

La célula suprarrenal cromafín ha probado su valor como modelo de laboratorio para neuronas y otras células secretoras. Quizá pronto pueda demostrarse su utilidad como sustituto de neuronas en clínica. Lars Olson y sus colegas, del Instituto Carolino, realizaron en 1982 el primer trasplante neural en seres humanos: transfirieron células cromafines de la médula suprarrenal al cerebro, en pacientes con avanzada enfermedad de Parkinson. En el parkinsonismo degeneran neuronas que contienen dopamina en determinado territorio del tronco del cerebro. Sobre una firme base de investigación, estos autores razonaron que, si las células cromafines producen dopamina como precursor de la noradrenalina, podrán compensar su déficit.

De los dos pacientes tratados con esta cirugía experimental, uno mostró mejoría significativa y el otro siguió en el mismo estado, sin empeorar. La posibilidad de que un día figure la célula cromafín en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson tipifica la utilidad de la investigación biológica básica, no por mero placer de un descubrimiento, sino por rendir inesperados beneficios a la humanidad.

El microscopio de efecto túnel

Una nueva clase de microscopio revela las estructuras de la superficie átomo a átomo. La versatilidad del instrumento hace que su uso pueda extenderse a investigaciones en física, química y biología

Gerd Binnig y Heinrich Rohrer

"La superficie fue inventada por el diablo", decía el ilustre físico Wolfgang Pauli. La frustración de Pauli se basaba en el hecho de que la superficie de un sólido representa la frontera entre éste y el mundo exterior. Mientras un átomo del interior de un sólido está totalmente rodeado por otros átomos, uno de la superficie puede interaccionar con otros átomos de la misma, o con los que estén inmediatamente debajo de ésta. Por tanto, las propiedades de la superficie de un sólido difieren radicalmente de las del interior. Así, los átomos de la superficie a menudo se colocan en una ordenación geométrica diferente de las de los otros átomos del sólido para minimizar la energía total del sistema. En virtud de este tipo de procesos, las estructuras superficiales poseen tal complejidad que han resistido hasta ahora una descripción teórica y experimental suficientemente precisa.

En el laboratorio de investigación de IBM en Zürich hemos desarrollado un instrumento que hace posible caracterizar cuantitativamente las complejidades de las superficies: el microscopio de efecto túnel. Nuestro microscopio le permite a uno "ver" los átomos de la superficie uno a uno. Puede incluso resolver estructuras que tienen sólo una centésima parte del tamaño del átomo. Una herramienta así tiene aplicaciones importantes, por ejemplo, en la industria microelectrónica. Al disminuir el tamaño de la pastilla ("chip") de silicio —que es el elemento clave en la arquitectura de los computadores— aumenta rápidamente su área superficial en relación a su volumen. Por tanto, la superficie adquiere creciente importancia en la operación de la pastilla y en sus interacciones con otros elementos lógicos. El microscopio de efecto túnel probablemente contribuirá también a la comprensión de otros fenómenos físicos, químicos y biológicos.

La microscopía de efecto túnel es el producto de una larga evolución. Se acepta que la microscopía comenzó en el siglo XV cuando se hicieron lentes de aumento para observar insectos. A finales del siglo XVII, Antony van Leeuwenhoek desarrolló el microscopio óptico, que reveló la existencia de células, agentes patógenos y bacterias. Aunque la microscopía óptica se ha desarrollado hasta convertirse en una técnica refinada y versátil, tiene un límite físico: el microscopio óptico no puede resolver estructuras atómicas. La razón es que la longitud de onda promedio de la luz visible es unas 2000 veces mayor que el diámetro típico de un átomo, que es del orden de unos tres angstroms. (El angstrom es una unidad de longitud igual a una diezmilmillonésima de metro, 1 Å = 10^{-10}m). En otras palabras, intentar visualizar estructuras atómicas con luz visible es como pretender descubrir grietas del tamaño de un cabello en una pista de tenis tirando pelotas sobre su superficie y observando su deflexión.

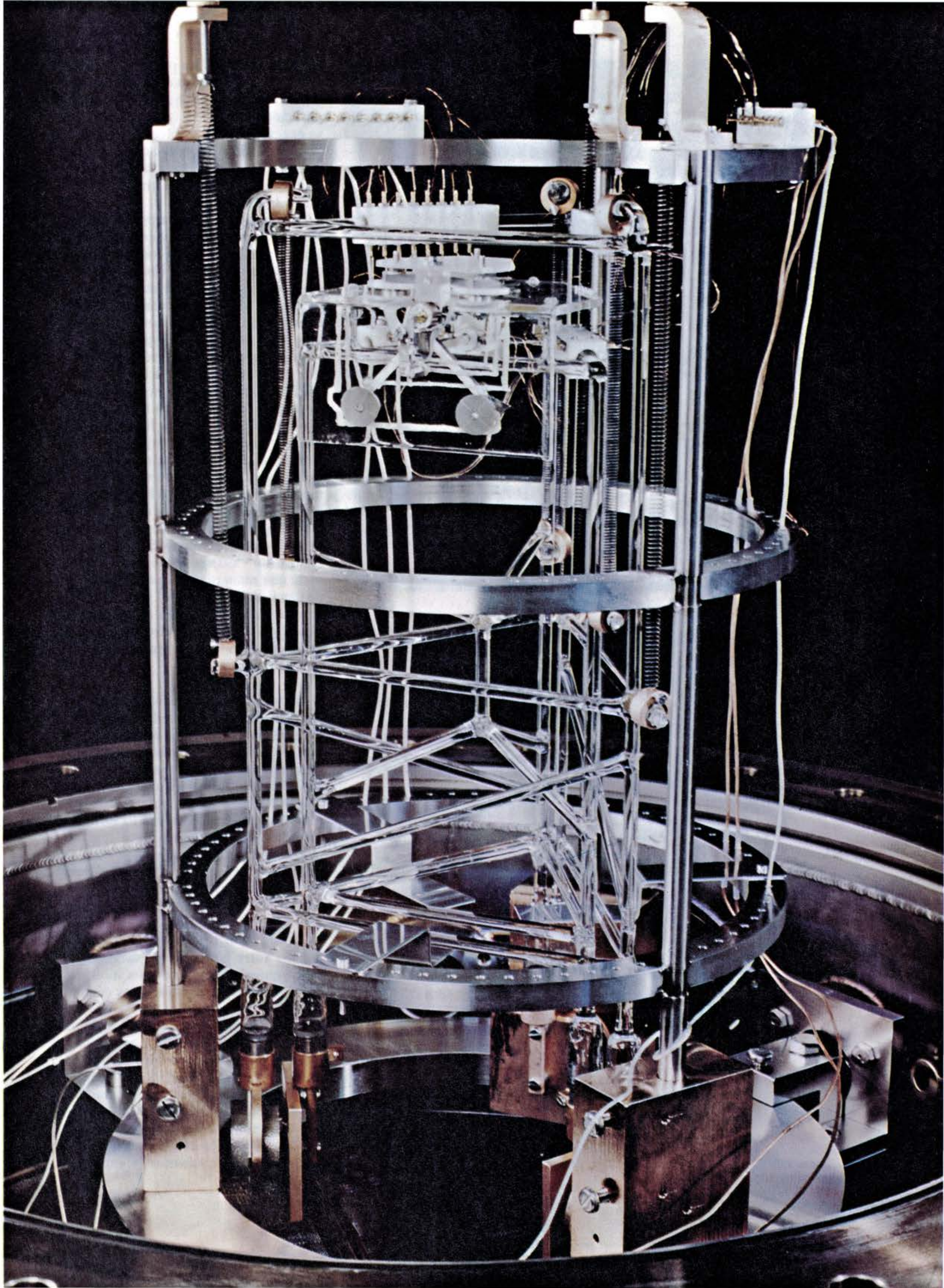
La primera exploración con éxito de estructuras atómicas surgió de un descubrimiento básico de la mecánica cuántica: la luz y otras clases de energía exhiben características tanto de partículas como de ondas. En 1927, Clinton J. Davisson y Lester H. Germer, de los laboratorios de la Bell Telephone, confirmaron la naturaleza ondulatoria del electrón. Encontraron, asimismo, que un electrón de alta energía tenía una longitud de onda más corta que un electrón de baja energía. Un electrón de suficiente energía presentaría, pues, una longitud de onda comparable al diámetro de un átomo. Este hecho condujo a la invención del microscopio electrónico. Con microscopía electrónica se han observado proyecciones de filas de átomos e incluso orbitales atómicos en delgadas películas cristalinas.

¿Por qué inventar otro tipo de microscopio, si el electrónico tiene tan alto poder de resolución? La razón para ello es que la microscopía electrónica, si bien ha demostrado ser fructífera para observar estructuras de volumen en materiales cristalinos, no puede resolver estructuras superficiales excepto en circunstancias muy especiales. Un electrón de alta energía penetra profundamente en la materia y apenas si revela pormenor alguno de la estructura superficial.

Un electrón de baja energía se mueve lentamente y lo desvían con facilidad los campos eléctricos o magnéticos de la muestra. En los años cincuenta, Edwin W. Müller daba un gran paso adelante con su invención del microscopio iónico de emisión de campo, un instrumento altamente sensible a las superficies. Por desgracia, su campo de aplicación es muy limitado. La muestra que se desea estudiar debe tallarse como una fina aguja de pocos angstroms de radio y debe ser, también, estable frente a los elevados campos eléctricos característicos de la técnica.

El principio de operación del microscopio de efecto túnel permite obviar

1. EL MICROSCOPIO DE EFECTO TUNEL tiene dos secciones, suspendidas de muelles, que anidan dentro de un armazón cilíndrico de acero inoxidable. La sección interior contiene el mecanismo del microscopio. Si se desea producir imágenes de alta resolución de las estructuras superficiales, el microscopio debe ser apantallado de las pequeñas vibraciones provocadas por los pasos de las personas o por el sonido. Los imanes (sujetos al fondo del armazón de acero inoxidable) y las placas de cobre (adheridas al fondo de las secciones externa e interna) amortiguan las vibraciones. Cualquier perturbación hace que las placas se muevan hacia arriba y hacia abajo en el campo magnético generado por los imanes. El movimiento produce corrientes inducidas en las placas. La interacción entre las corrientes inducidas y el campo magnético frena el movimiento de las placas y, por tanto, el de las dos secciones del microscopio. Para el trabajo en vacío se coloca una campana de acero sobre el armazón exterior del microscopio.

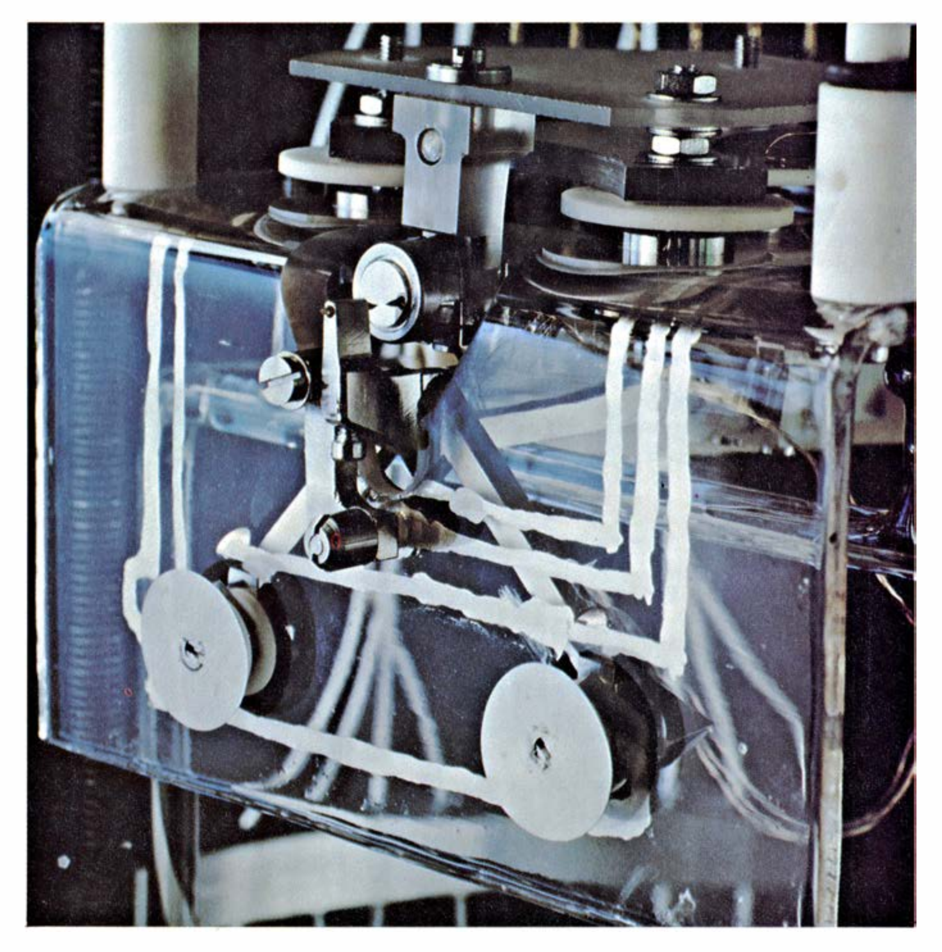


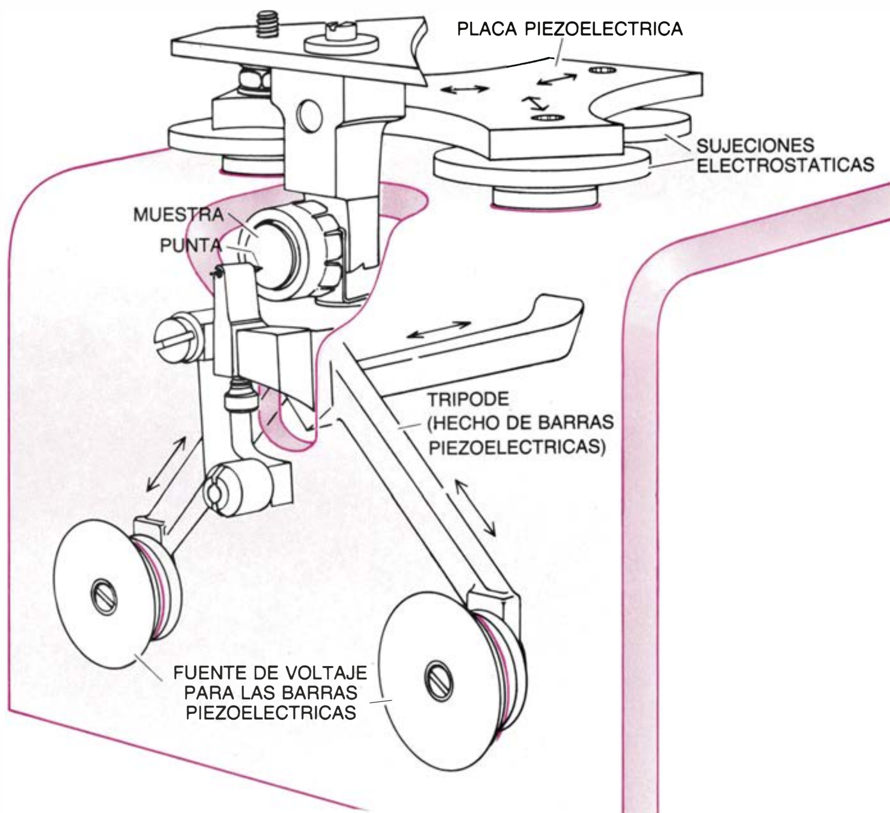
estas dificultades. La principal diferencia entre el microscopio de efecto túnel y todos los demás es que éste no utiliza partículas libres; en consecuencia, no se necesitan lentes ni fuentes especiales de electrones o fotones. Su única fuente de radiación son los electrones ligados que ya existen en la muestra sometida a investigación.

Para comprender este principio imaginemos que los electrones ligados a la superficie de la muestra son análogos al agua de un lago. Del mismo modo que parte del agua se filtra al terreno circundante formando corrientes subterráneas, algunos electrones de la superficie de la muestra se "fugan" de ésta y originan una nube electrónica alrededor de la muestra. De acuerdo con la física clásica, esta nube no podría existir porque la reflexión en los límites de las superficies confina las particulas dentro de ellas. Sin embargo, esto no es cierto en mecánica cuántica, donde cada electrón se comporta como una onda: su posición no está bien definida, se "difumina". Se explica así la existencia de electrones allende la superficie de la materia. La probabilidad de encontrar un electrón decae rápidamente —de una manera exponencial— con la distancia de la superficie. Este efecto se conoce tradicionalmente como "efecto túnel" ya que los electrones parecen estar cavando túneles más allá de su frontera clásica.

La primera verificación experimental del efecto túnel fue llevada a cabo hace un cuarto de siglo por Ivar Giaever, de la General Electric Company. Para ello colocó una capa aislante, rígida y delgada, separando dos placas metálicas llamadas electrodos. La distancia entre los electrodos era lo suficientemente pequeña como para que las nubes electrónicas asociadas a ellos se solaparan ligeramente. Una diferencia de potencial entre los electrodos —inducida por un voltaje aplicado— hace que algunos electrones fluyan de un electrodo a otro a través del solapamiento entre las nubes de carga. Este flujo equivale al flujo de agua subterránea entre dos lagos adyacentes cuando uno está más alto que otro.

Hemos construido el microscopio de efecto túnel haciendo algunos cambios básicos en la típica configuración de túnel. En primer lugar, reemplazamos uno de los electrodos por la muestra que queremos investigar. A continuación, sustituimos el otro electrodo por una punta afilada como una aguja. Y finalmente reemplazamos la capa ais-



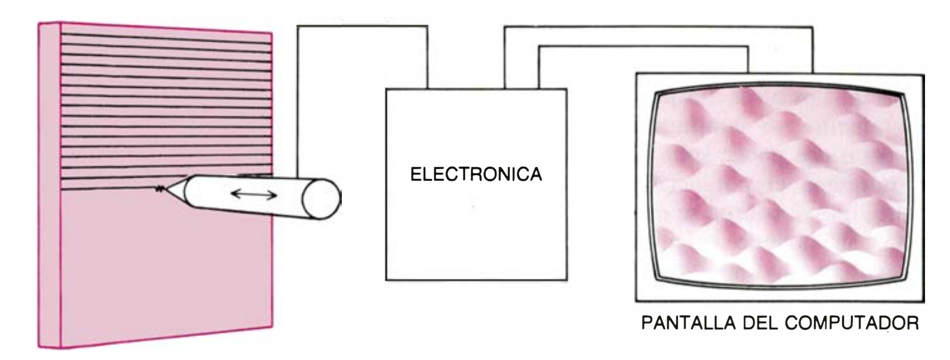


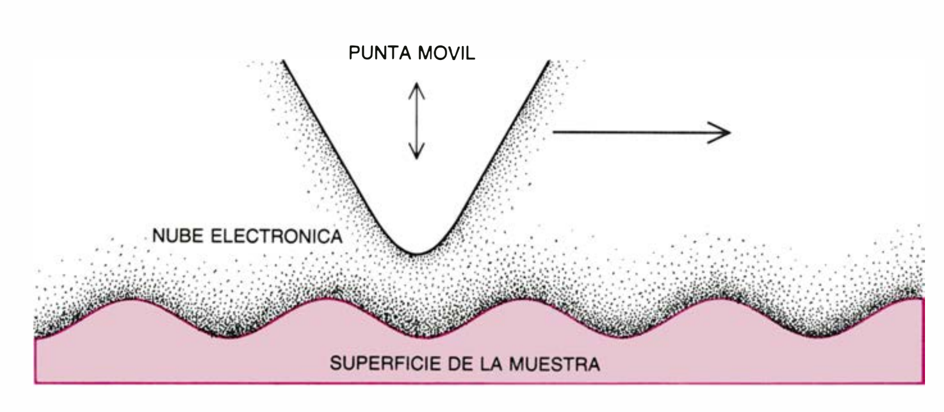
2. CONSTA EL DISPOSITIVO DEL MICROSCOPIO de una muestra y una aguja para barrer la superficie. Materiales piezoeléctricos, que se expanden o contraen al aplicarles voltaje, permiten que el dispositivo resuelva estructuras que tienen tan sólo una centésima parte del tamaño de un átomo. Un portamuestras piezoeléctrico acomoda la muestra sobre una placa metálica horizontal. Un trípode piezoeléctrico barre la punta sobre la superficie de la muestra, simultaneando alta estabilidad y precisión.

lante rígida por otro aislante, no rígido, un líquido, un gas o el vacío, por ejemplo, de modo que fuera posible desplazar la punta de la aguja sobre los contornos de la superficie de la muestra.

Para barrer la superficie empujamos la punta hacia la muestra hasta que las nubes electrónicas respectivas se tocan suavemente. La aplicación de un voltaje entre la punta y la muestra induce que los electrones pasen de una a otra a través de un estrecho canal en las nubes electrónicas. Este flujo se llama corriente de túnel. Como la densidad de una nube electrónica decae exponencialmente con la distancia, la corriente de túnel es sumamente sensible a la distancia entre la punta y la superficie. Un cambio en la distancia en una cantidad igual al diámetro de un solo átomo hace disminuir la corriente de túnel en un factor de 1000.

Así pues, nos es dado explotar la sensibilidad de la corriente túnel para realizar mediciones precisas de la posición vertical de los átomos de la superficie de la muestra. Mientras la punta es barrida sobre la superficie, un mecanismo electrónico de realimentación mide la corriente de túnel y mantiene la punta a distancia constante sobre los átomos de la superficie. De este modo, la punta sigue los contornos de la superficie. El movimiento de la punta es leído y procesado por un computador y aparece en una pantalla o en un registrador. Se obtiene una imagen tridimensional de la superficie obligando a que la punta barra un conjunto de líneas paralelas entre sí. Una distancia de 10 centímetros en la imagen viene a representar una distancia de 10 angstroms en la superficie. Se ha conseguido un aumento de 100 millones.





3. EN EL EFECTO TUNEL DE ELECTRONES esta basada la operación del microscopio. Una nube electrónica ocupa el espacio entre la superficie de la muestra y la punta de la aguja (*abajo*). La nube es consecuencia de la indeterminación en la localización del electrón (un resultado de sus propiedades ondulatorias); hay una probabilidad no nula de encontrar al electrón más allá de la frontera superficial de un conductor ya que el electrón está difuminado. La densidad de la nube electrónica disminuye exponencialmente con la distancia. Un flujo de electrones a través de la nube, inducido por una diferencia de potencial, es, por tanto, extremadamente sensible a la distancia entre la superficie y la punta. Al barrer esta última la superficie, un mecanismo de realimentación mide el flujo de electrones (llamado la corriente túnel) y mantiene constante la altura de la punta por encima de los átomos de la superficie (*arriba*). De este modo, la punta sigue los contornos de la superficie. El movimiento de la punta se lee y procesa por un ordenador y aparece en una pantalla o en un registrador. Barriendo con la punta un conjunto de líneas paralelas se obtiene una imagen tridimensional de alta resolución de la superficie examinada.

¿Cómo es posible mover la punta sobre la muestra manteniendo constante la distancia entre ella y la superficie, que es de menos de 10 angstroms, con una estabilidad y precisión superior a los 0,1 angstroms? En primer lugar, el microscopio debe ser apantallado de las vibraciones externas, como las causadas por el sonido en el aire o por la gente que anda por el edificio. En segundo lugar, los movimientos de la punta deben ser muy precisos. Y, por último, la punta será tan afilada cuanto lo permitan los límites de rigidez y estabilidad.

Dos etapas, o secciones, suspendidas de unos muelles, anidan en el armazón de acero inoxidable del microscopio y protegen de las vibraciones la distancia de túnel. Ambas etapas —de sección triangular— están hechas de barras de vidrio. La segunda sección se desliza en el interior de la primera, de la cual está suspendida mediante tres muelles. A su vez, la primera etapa está suspendida del armazón exterior también mediante tres muelles. La segunda sección lleva el corazón del microscopio: la muestra y el dispositivo de barrido de la punta.

Cuando el conjunto del microscopio está en vacío, la resistencia al movimiento es mínima y ambas etapas de suspensión podrían oscilar casi indefinidamente bajo cualquier perturbación. El fenómeno del amortiguamiento por corrientes de Foucault es lo que utilizamos para detener este movimiento. Para ello, se colocan unas placas de cobre en la parte inferior de ambas secciones que se deslizan entre unos imanes permanentes y sujetos al armazón exterior. Al deslizarse las placas arriba o abajo, el campo magnético hace que los electrones de conducción del cobre se muevan induciendo las llamadas corrientes de Foucault. La interacción entre las corrientes inducidas y el campo magnético frena el movimiento de las placas y protege, por tanto, el microscopio hasta de las vibraciones más pequeñas.

Una vez eliminadas las vibraciones externas, se acomoda la muestra. Nos servimos para ello de un dispositivo especialmente desarrollado que transporta la muestra a través de una placa metálica horizontal situada en la segunda etapa. El cuerpo del portamuestras consiste en una lámina de material piezoeléctrico que se expande o se contrae al aplicarle un voltaje. El portamuestras posee tres pies metálicos, dispuestos en un triángulo, que están recubiertos de una capa delgada de material aislante. Los pies pueden fijarse a la placa metálica aplicando un voltaje entre ellos y ésta.

Movemos el portamuestras de la manera que a continuación detallamos. Supongamos, por ejemplo, que fijamos

sólo un pie y aplicamos un voltaje al cuerpo del piezoeléctrico, que así se contrae. Los otros dos pies se moverán ligeramente. A continuación, fijamos las otras dos patas, soltamos la tercera y quitamos el potencial aplicado de suerte que el cuerpo se estire de nuevo hasta su tamaño original. El portamuestras se ha movido justamente un paso. El tamaño del paso se puede regular entre 100 y 1000 angstroms. El portamuestras caminará a lo largo de la placa en la dirección deseada, ya que puede girar alrededor de cualquiera de sus patas.

Cuando el portamuestras ha llevado la muestra hasta la posición de túnel elegida, empezamos a barrer la superficie de la muestra. Para mover la punta de la aguja de barrido se emplea un trípode rígido hecho de tres barras de material piezoeléctrico. Cuando aplicamos un voltaje para expandir o contraer una de las barritas, las otras dos se tuercen ligeramente. En consecuencia, la punta se mueve en línea recta distancias de hasta 10.000 angstroms. Más aún, el movimiento es muy sensible a la magnitud del voltaje aplicado: un voltaje de 0,1 volt produce un movimiento de 1,0 angstrom. La precisión del movimiento del trípode es finísima, hasta el extremo de que la resolución vertical obtenida hoy sobre la superficie de la muestra queda limitada sólo por las vibraciones. En el momento actual esta resolución se halla en el rango de contadas centésimas de angstrom.

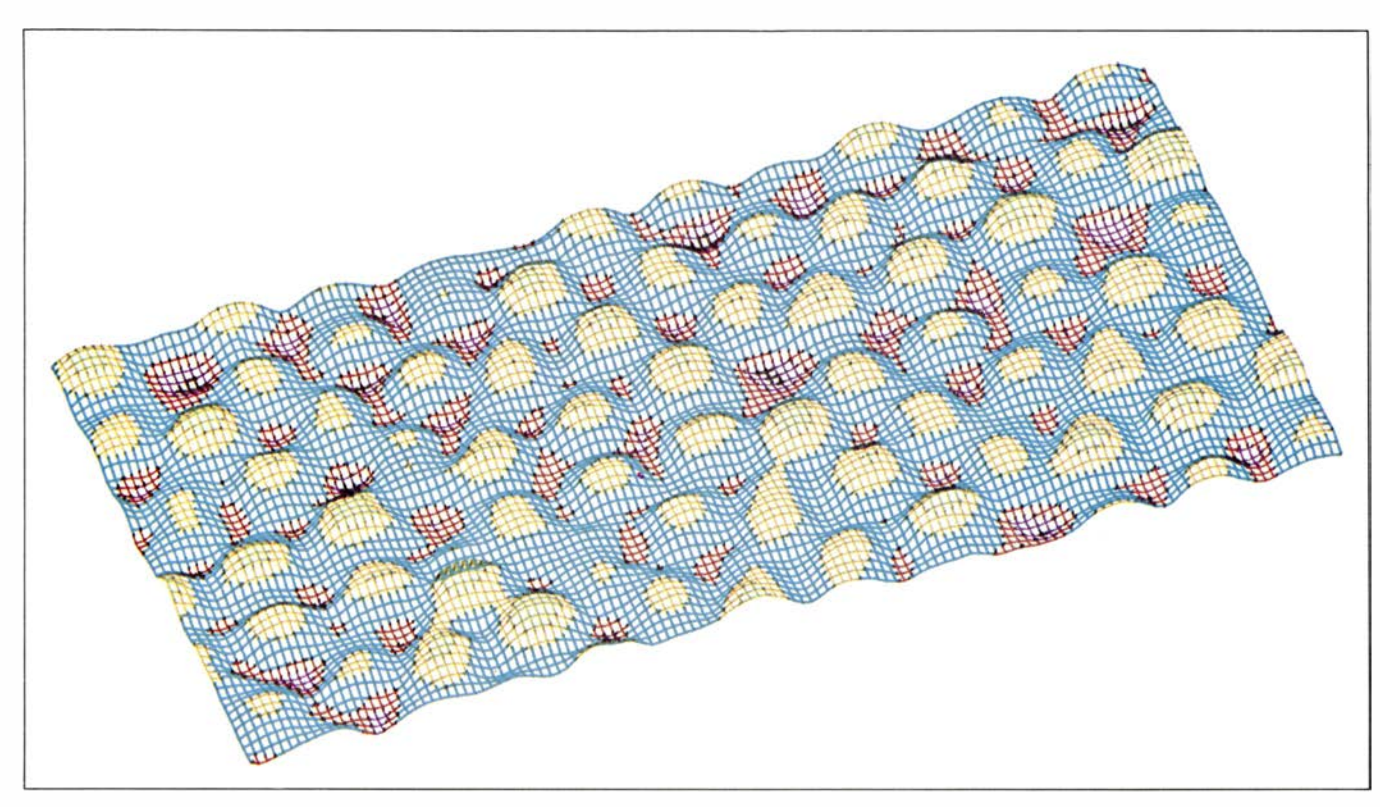
La resolución lateral del microscopio está limitada por cuán afilada sea la punta. Con respecto a esto, la naturaleza ha sido generosa con el microscopio túnel. Es relativamente fácil hacer una punta afilada que nos dé una resolución lateral de 6 a 12 angstroms: sólo hace falta pulir la punta de una aguja, normalmente de tungsteno.

Ahora bien, si se desea una resolución lateral de dos angstroms, la aguja debe tener un solo átomo al final de la punta. Normalmente ese átomo viene de la misma muestra. Lo desplazan de ella altos campos eléctricos producidos al aplicar una diferencia de potencial de entre 2 y 10 volt entre la muestra y la punta. La suerte desempeña un papel importante en este paso final y por eso estamos intentando afilar la punta mediante bombardeo con un haz de iones de alta energía. Así se pueden eliminar átomos de la superficie de un modo muy controlado.

Además de delinear la topografía atómica de la superficie, el microscopio de efecto túnel revela la composición atómica. La corriente de túnel depende de la distancia de túnel y de la estructura electrónica de la superficie. Ahora bien, cada elemento atómico posee una estructura electrónica característica.

La capacidad del microscopio para resolver tanto la topografía como la estructura electrónica lo hace útil para la investigación en física, química o biología. Estudiamos en primer lugar un caso simple: las estructuras topográficas de monocristales caracterizados por una estructura superficial homogénea. Los cristales constan de capas atómicas idénticas que se apilan ordenadamente unas sobre otras. Resultados de experimentos de difusión de electrones o átomos indicaban que la capa superior difería de las otras y era más compleja, pero resultaba difícil determinar la estructura detallada de esta capa superficial.

La estructura de superficie más conocida es la celda unidad de silicio. La celda unidad tiene forma de rombo; cada borde de la celda mide siete distancias atómicas, por lo que la celda se denomina 7 por 7. Cada 7 por 7 contiene 12 protuberancias, que no se habían visualizado antes. Cada protuberancia corresponde manifiestamente a un solo átomo. Aunque de estética agradable,



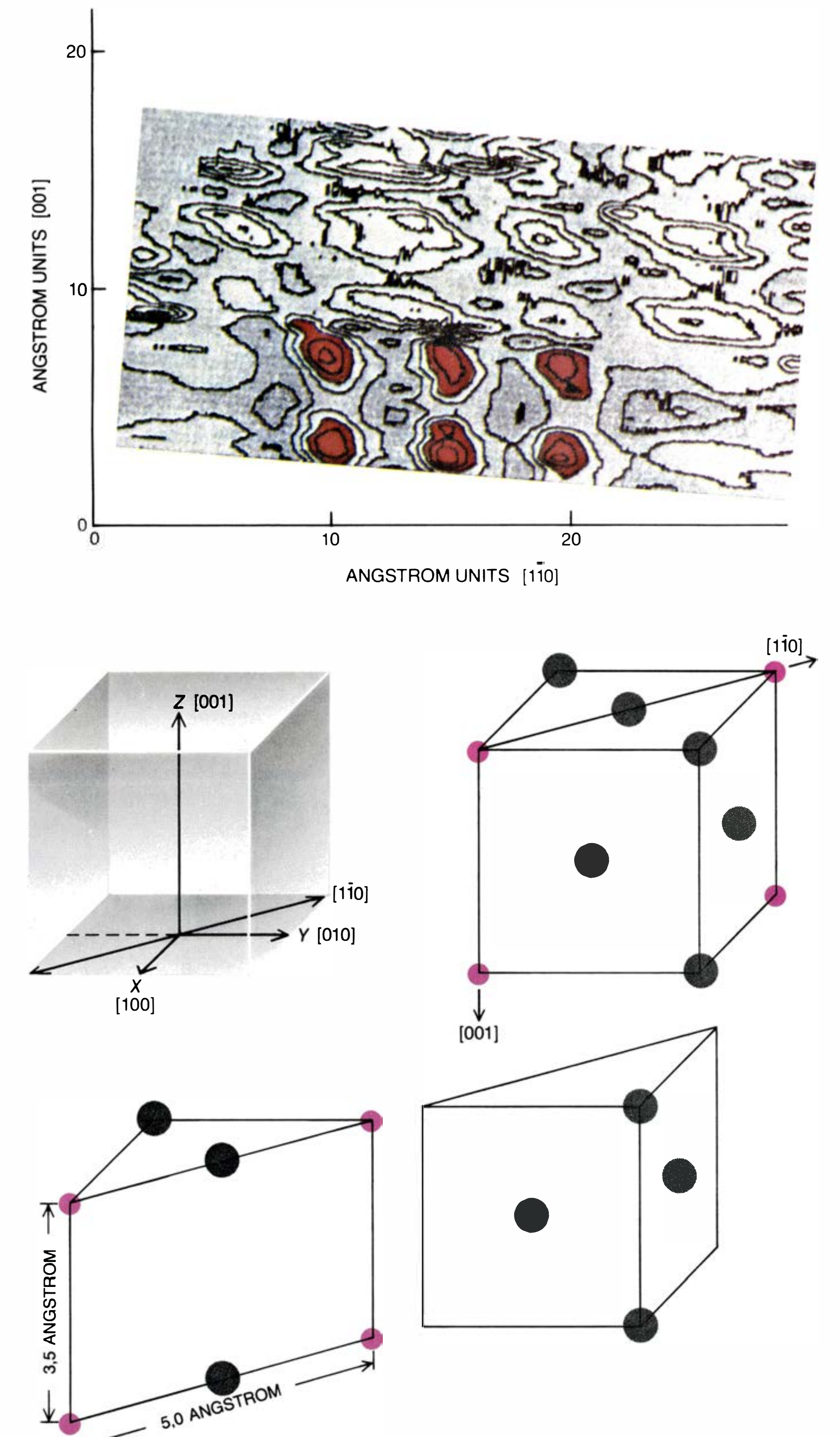
4. SUPERFICIE DE SILICIO visualizada por el microscopio de efecto túnel; consiste en un conjunto de celdas unidad de forma romboidal. Cada celda mide 27 angstroms (un angstrom es una diezmilmillonésima de metro, 1 Å = 10^{-10}m) de lado. La celda se llama 7 por 7 porque cada lado mide siete distancias atómicas. Cada 7 por 7 contiene 12 protuberancias en dos grupos de seis. Las protuberancias parecen corresponder a las superficies de los átomos individuales. Se elevan 1,3 angstroms sobre el resto. La imagen se obtuvo aplicando un voltaje para que los electrones pasaran de la punta a la superficie.

la disposición de los átomos de la superficie reviste suma complejidad. En cambio, las estructuras de las capas interiores del silicio son relativamente simples. Su celda unidad es 49 veces menor que la 7 por 7 y contiene sólo dos átomos. Otra diferencia radica en el hecho de que la capa superficial es mucho más rugosa que cualquier capa del volumen. Aunque ahora se conoce la estructura superficial y ha sido posible obtener una gran cantidad de información sobre ella a través de otros experimentos, se ignora por qué razón la superficie forma esta estructura y no otra cualquiera.

Otro cristal cuya superficie se comprende ahora mejor es la del cristal de oro. Hemos encontrado que, al cortar el cristal en una dirección paralela a sus capas atómicas, la cara resultante es plana. En cambio, un corte en una dirección diagonal a las capas atómicas produce una superficie más rugosa. Así como el estudio actual de la corteza terrestre nos ayuda a comprender que ésta se formó hace millones de años, el estudio de las superficies nos permite entender cómo se modificaron desde que se cortaran. Las teorías actuales predicen que la superficie cortada diagonalmente adquiere una estructura dentada porque esa configuración tiene una energía menor que la configuración plana y, consecuentemente, es más estable.

Una rama más exótica de la física, el estudio de la superconductividad, se ha beneficiado también de la aplicación de la microscopía de efecto túnel. El material superconductor se caracteriza por su completa falta de resistencia eléctrica. El uso de cables superconductores que estarían libres de pérdidas por calentamiento ahorraría cantidades enormes de energía eléctrica. Así, por ejemplo, el acelerador para la colisión de haces de partículas de Fermilab utiliza imanes superconductores para alcanzar elevados campos magnéticos ahorrando energía. Hay un inconveniente, sin embargo. Se sabe que la superconductividad sólo ocurre en algunos conductores cuando han sido enfriados por debajo de una temperatura crítica, unos pocos grados por encima del cero absoluto (−273,15 grados centígrados).

Un grupo de investigadores de la Universidad de Stanford, dirigidos por Calvin F. Quate, ha desarrollado un microscopio de efecto túnel que opera a bajas temperaturas. Usaron su microscopio para visualizar la estructura electrónica de las superficies de varios



5. OXIGENO ADSORBIDO en níquel (*arriba*) observado en escala atómica. Los átomos de oxígeno (*color*) están separados 3,5 angstroms en una dirección, llamada [001], y 0,5 angstroms en la otra [110]. El modelo del cristal de níquel cúbico centrado en las caras (*abajo*) sugiere la razón para ello. La geometría del modelo predice que si la distancia entre dos átomos de níquel contiguos a lo largo de la dirección [001] es de 3,5 Å, el espaciado a lo largo de la dirección [1$\bar{1}$0] será de 2,5 Å. Sin embargo, la repulsión electrónica entre dos átomos de oxígeno es demasiado grande para permitirles permanecer establemente en puntos de la red separados tan sólo 2,5 angstroms. Por tanto, los átomos de oxígeno que caigan a lo largo de la dirección [1$\bar{1}$0] distarán entre sí, por lo menos, dos veces el parámetro de red, lo que corresponde a la distancia observada de 5,0 angstroms. A veces se observan separaciones de cinco veces el parámetro de red, pero nunca de tres o cuatro veces. Habrá que investigar la causa de esta anomalía.

conductores a temperatura ambiente. Enfriaron luego los conductores por debajo de la temperatura crítica de cada uno y estudiaron los cambios en su estructura electrónica. Este grupo puede presentar pruebas experimentales del crecimiento de las regiones superconductoras en las superficies.

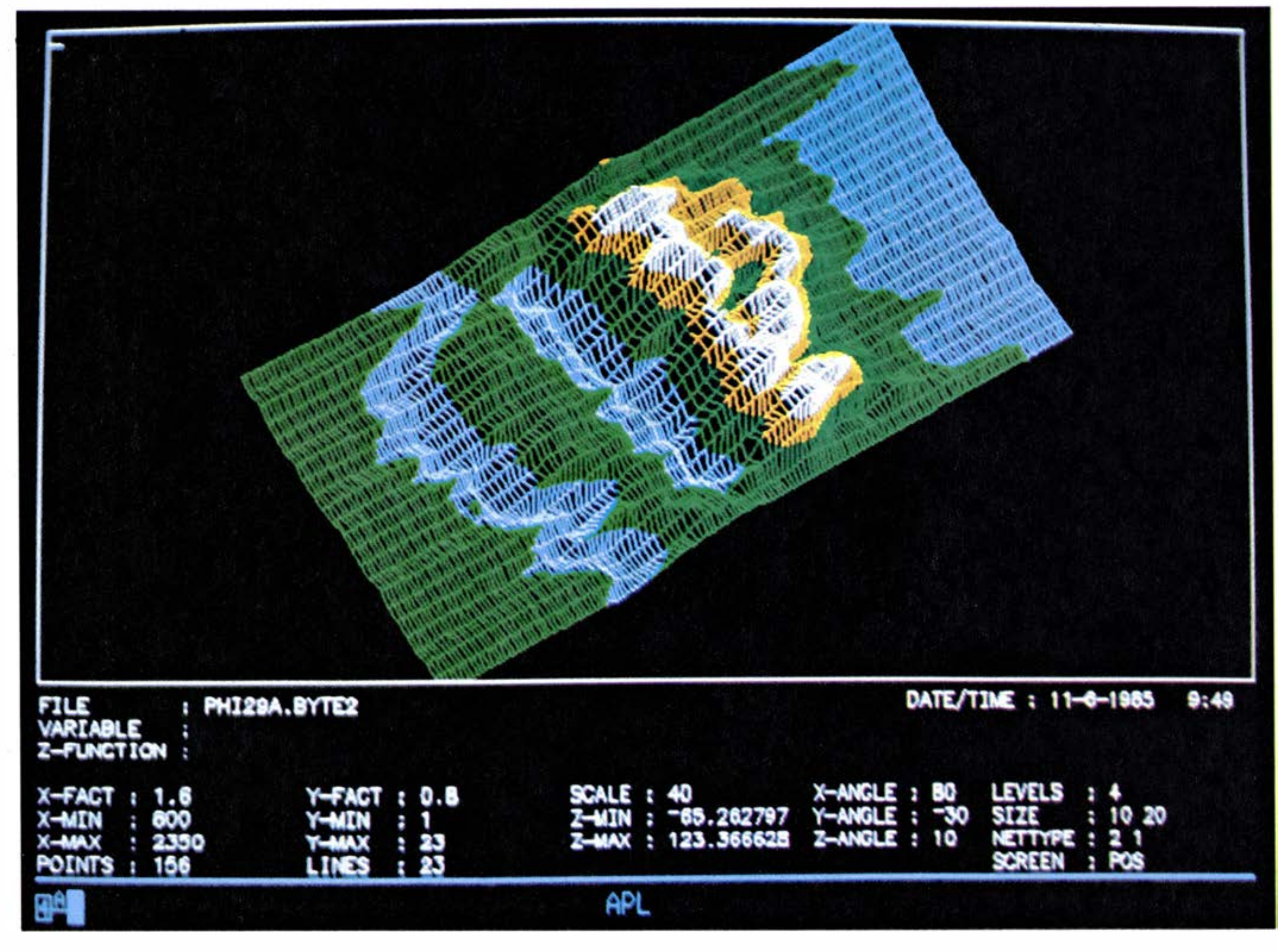
El microscopio de efecto túnel ha posibilitado una comprensión más detallada de ciertas reacciones químicas. Nuestro grupo ha observado en una escala atómica la adsorción de oxígeno en níquel [*véase la figura 5*]. Nuestras observaciones confirman resultados previos de experimentos de difusión: la distancia entre los átomos de oxígeno adsorbidos sobre la superficie del níquel varía con la dirección. En particular, los átomos de oxígeno que están a lo largo de una cierta dirección, llamada [001], están separados por una distancia igual al parámetro de red; esto es, la distancia entre dos átomos de níquel contiguos a lo largo de esa dirección. En cambio, los átomos de oxígeno a lo largo de la dirección perpendicular, llamada [1$\bar{1}$0], están separados dos o cinco parámetros de red, pero nunca uno, tres o cuatro. Sospechamos que esta anomalía la causa algún tipo de efecto de apantallamiento entre las cargas eléctricas del níquel y del oxígeno, pero se requiere una investigación exhaustiva para determinar los detalles de la interacción real.

Todas las aplicaciones que hemos examinado hasta ahora se basan en la capacidad del microscopio para detectar estructuras cuyas dimensiones se miden en fracciones de angstrom. Tan alta resolución no siempre es necesaria. Hay algunos campos de investigación donde, si bien la resolución del microscopio de efecto túnel sea tan sólo de algunas decenas de angstroms, podemos esperar, en virtud de resultados ya obtenidos, que su uso producirá información nueva y valiosa y estimulará progresos significativos. En particular, para muchas aplicaciones, la posibilidad de operar el microscopio de efecto túnel en aire a presión atmosférica compensará con creces la pérdida de resolución que hubiere.

Una de estas aplicaciones se encuentra en el estudio de la fricción. Para minimizar las pérdidas de energía asociadas al rozamiento, los investigadores están interesados en conocer mejor la estructura y las causas de la rugosidad superficial del material industrial. Recientes estudios sugieren que el microscopio de efecto túnel resulta especialmente adecuado para este tipo de trabajo.

Nuestro microscopio ha demostrado también su utilidad en biología, aunque sólo alcance hoy resoluciones laterales de unos 10 angstroms. Este es otro caso en que la relativamente baja resolución del microscopio queda más que compensada por su capacidad para suministrar un método directo y no destructivo de visualizar muestras biológicas.

Otros microscopios destruyen parcialmente las muestras enfocadas. Así, en microscopía electrónica convencional, las muestras deben recubrirse con una delgada capa metálica y, ya que se estudian en vacío, se secan. Este proceso podría alterar las muestras de un modo indeseable —e incontrolable—



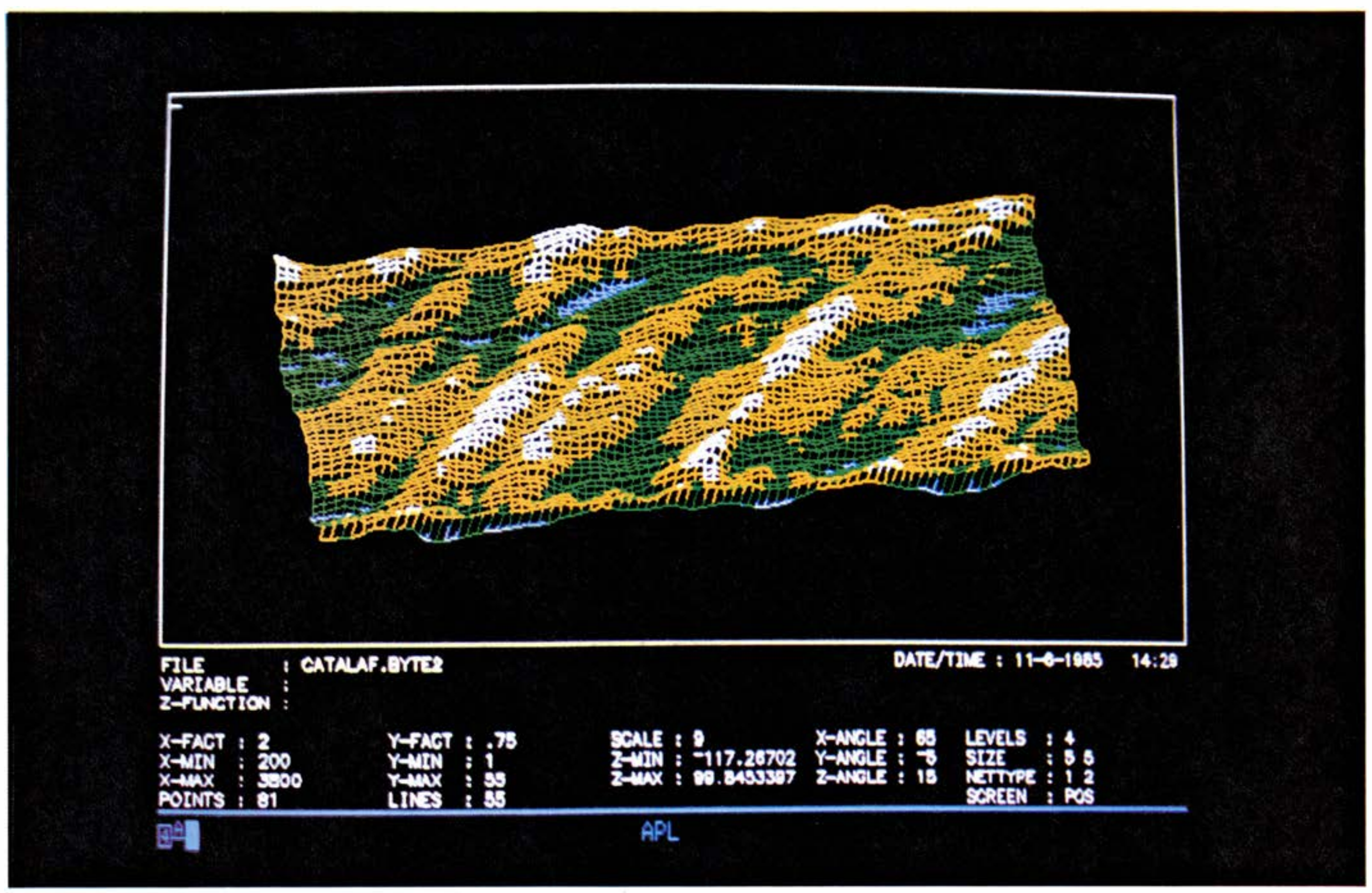
6. EL COLLAR DEL VIRUS ∅ 29 conecta la cabeza del microorganismo a su cola. Microfotografías electrónicas sin procesar como la ofrecida han ayudado a poner de manifiesto la estructura del collar, cuya comprensión resulta decisiva para controlar la propagación de ciertas infecciones víricas.

pues las moléculas de agua constituyen parte esencial de las substancias biológicas. En el microscopio de efecto túnel puede incluso usarse agua como barrera aislante entre la muestra y la aguja de sondeo. (El agua es un conductor relativamente pobre, a no ser que contenga iones como los que se forman cuando se disuelve cloruro sódico en ella.) Explotando la sensibilidad del microscopio de efecto túnel hemos barrido la superficie del ácido nucleico ADN con la ayuda de E. Courtens, del laboratorio de investigación de IBM en Zürich, y de H. Gross y J. Sogo, del Instituto Politécnico Federal. Hemos observado una serie de zigzags correspondiente a la estructura helicoidal del ADN.

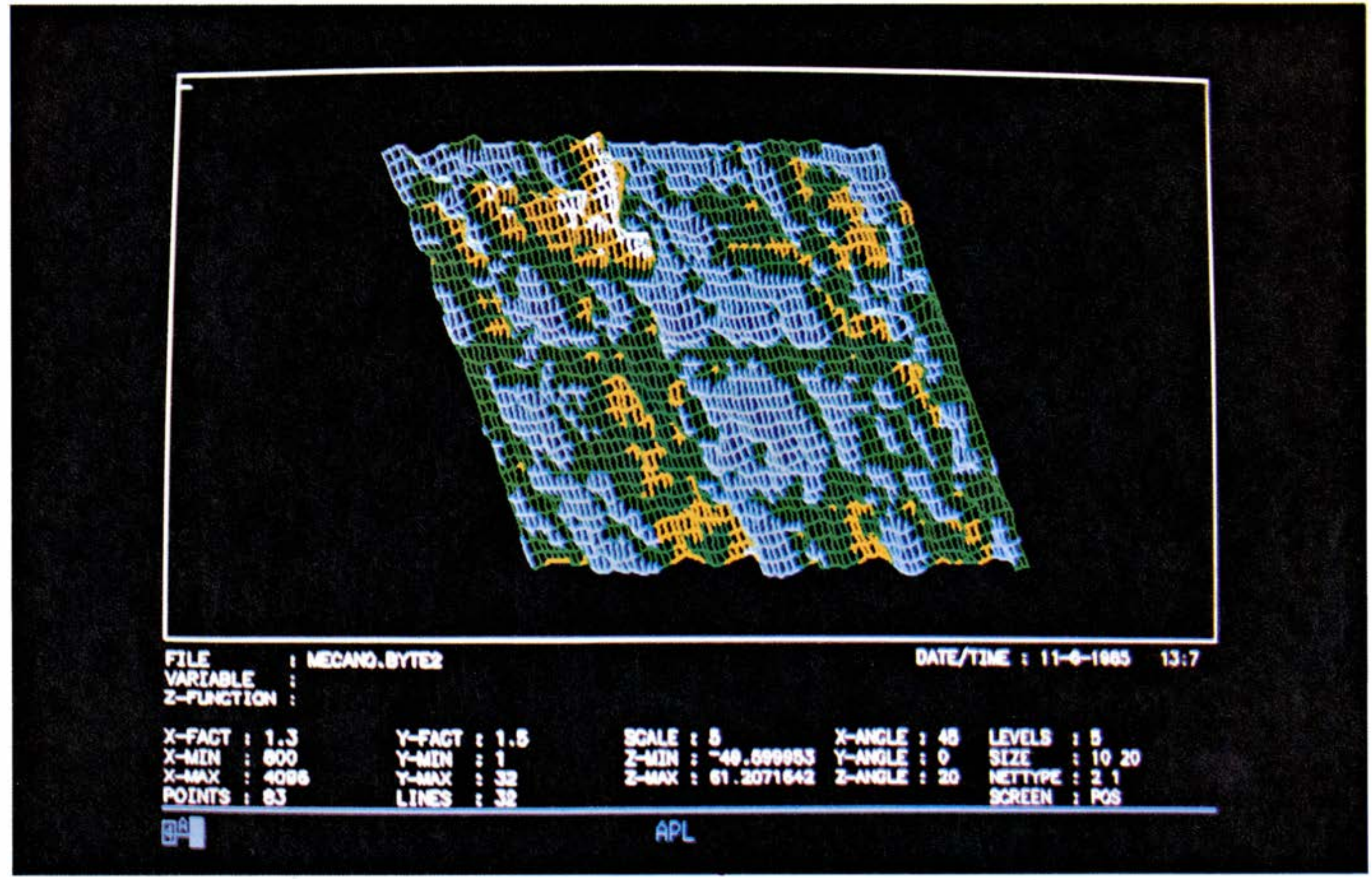
En un esfuerzo cooperativo con los físicos españoles Arturo Baró, Nicolás García y Rodolfo Miranda, de la Universidad Autónoma de Madrid, y el biólogo José L. Carrascosa, del Centro de Biología Molecular, hemos confirmado que la cabeza del virus conocido como ∅ 29 mide 400 × 300 × 200 angstroms. Ha quedado desvelada la estructura de la conexión entre la cabeza y la cola del virus, llamada collar, que parece desempeñar un papel significativo en el proceso de infección. El resultado está de acuerdo con lo que se conocía a partir de microfotografías de microscopio electrónico procesadas.

Además de producir imágenes, la punta de sondeo servirá para comprobar circuitos electrónicos. En efecto, las sondas que verifican los componentes electrónicos deben ser miniaturizadas al mismo ritmo que los propios componentes. La punta puede valer de sonda local del voltaje así como de fuente de corriente.

En todas las aplicaciones descritas es vital que el proceso de obtención de la imagen no destruya ni altere el objeto. Pero el microscopio de efecto túnel promete también ser una herramienta para estimular procesos químicos específicos. Una de las características notables del microscopio es poseer un haz de electrones de baja energía extremadamente bien focalizado: su corriente túnel. La energía del haz puede estar precisamente en el rango de energías de la mayoría de los procesos químicos. Por tanto, ajustando el haz a energías específicas, los investigadores pueden provocar a voluntad ciertas reacciones. Este modo de operación del microscopio y las otras capacidades del instrumento parecen abrir una gama de posibilidades de investigación completamente nueva.



1. Imagen de un cristal de catalasa, enzima empleada para eliminar de las células el agua oxigenada producida en ciertas reacciones. La enzima se cristaliza y deposita sobre un substrato conductor y plano. La periodicidad observada en la imagen a lo largo del eje horizontal está en buen acuerdo con la obtenida en imágenes de miscroscopía electrónica de transmisión



2. El microscopio de efecto túnel muestra que la superficie de un bloque patrón clase "0", de rugosidad nula, no es plano en absoluto. La rugosidad observada débese probablemente al micrograno del agente empleado en el pulido. La escala de colores, blanco, amarillo, verde y celeste corresponde a mayor o menor altura del perfil topográfico

Ciencia y sociedad

Microscopía de efecto túnel en España

Desde julio de 1984 contamos en nuestro país con un microscopio de efecto túnel instalado en el departamento de física fundamental de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). La adquisición del mismo entró dentro del convenio de cooperación entre el laboratorio de investigación de IBM en Zürich, la UAM, el Centro de Biología Molecular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y el Centro IBM-UAM.

El objetivo del convenio era abordar la aplicación del microscopio de efecto túnel a la investigación de muestras biológicas. Para ello había que conseguir que el microscopio trabajase a presión atmosférica, condición necesaria para estudiar las muestras en situaciones similares a las de la vida real. En efecto, los organismos están adaptados, en nuestro planeta, a la presión atmosférica y a desarrollarse en ambientes saturados de agua. Hasta ahora, el estudio microscópico de los objetos biológicos se ha llevado a cabo en condiciones muy alejadas de la vida real: en vacío, sin agua, protegidos por capas metálicas, etcétera. Tratamientos que violentan las muestras. Por otro lado, los microscopios que podían utilizarse a presión ambiente poseían una resolución bastante limitada.

Todo ello convertía a este proyecto en un excitante desafío a los límites de nuestro conocimiento. El primer hallazgo obtenido por nuestro equipo, de tres físicos (Baró, García y Miranda) y el biólogo José L. Carrascosa, fue que la operación del microscopio a presión atmosférica era sorprendentemente fácil. De hecho, el mismo diseño creado por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, que describe este mismo número de *Investigación y Ciencia,* en la IBM de Zürich podía funcionar al aire, si bien con menor resolución que la alcanzada en vacío. La resolución actual operando al aire está entorno 1,0 angstroms en la dirección vertical y 5-10 angstroms en la dirección horizontal. La resolución está limitada por el grado en que se amortigüen las vibraciones externas, mucho más importantes a presión atmosféricas que en vacío.

La razón por la que el microscopio funciona, aunque entre la punta y la superficie a estudiar haya aire (o incluso un líquido) en vez de vacío, estriba en que este microscopio no emplea partículas libres. Los electrones que forman la corriente túnel o bien están localizados en la muestra o en la punta y no sienten la naturaleza del material que hay entre ambas.

Los primeros ensayos acometidos en el terreno de la biología se han encaminado a reproducir, utilizando el microscopio de efecto túnel, la estructura de algunos objetos biológicos conocidos de antemano a través de la microscopía electrónica de transmisión. Se ha visualizado el conector del virus ϕ 29, el collar, cuya imagen recoge el artículo de Binning y Rohrer. La imagen está en buen acuerdo con la reconstrucción tridimensional obtenida por José L. Carrascosa y su equipo tras varios años de esfuerzos a partir de datos de microscopía electrónica. La diferencia radica en que, para obtener esta información tan detallada mediante microscopía electrónica: 1) se deben preparar cristales ordenados del objeto, y 2) como en microscopía de transmisión lo que se tiene es una proyección bidimensional de la muestra, hay que tomar datos a distintos ángulos para lograr, mediante un complejo proceso de tratamiento de imágenes, una representación en tres dimensiones del objeto deseado.

El microscopio de efecto túnel produce directamente una imagen tridimensional del objeto en un tiempo del orden de minutos. No es necesario tener un cristal del objeto para visualizar. Y ello, en condiciones de presión ambiente de aire y muestras húmedas.

Una sección importante de este dominio de la investigación se ocupa de caracterizar con precisión el funcionamiento del microscopio en muestras biológicas ordenadas. En esta línea, la figura 1 aporta los primeros resultados obtenidos con un cristal de proteínas, de catalasa en concreto, donde se observan surcos alineados con la periodicidad ya conocida mediante difracción de rayos X.

Un segundo objetivo del proyecto es estudiar muestras de interés tecnológico e industrial. También en este campo reviste particular interés estudiar las superficies de las muestras a presión atmosférica, incluso en presencia de líquidos, condición esta en que se dan los procesos industriales. La caracterización cada vez más detallada del acabado superficial de piezas industriales, como rodamientos, tornillos de ultraprecisión y otros, se va imponiendo como una necesidad en la industria moderna. Así se han estudiado superficies de turbinas, de pistones de inyección de motores diesel o superficies de fractura de una ala de avión. Como un ejemplo de las posibilidades de este microscopio la figura 2 muestra la superficie de un bloque patrón que se utiliza para calibrar micrómetros industriales. Este bloque aparece plano cuando se observa con el aparato usado para medidas de rugosidad superficial. En cambio, el microscopio de efecto túnel revela un notable grado de rugosidad resultante del proceso final de pulido de la pieza.

Hemos empleado el microscopio de efecto túnel para estudiar células solares policristalinas en busca de un método eficaz y barato de aprovechar ese recurso energético. En microelectrónica, tanto los materiales utilizados (películas metálicas evaporadas, semiconductores, óxidos) como los resultados de diversos procesos (ataque químico preferencial, litografía, etc.) se visualizarán con resolución sin precedentes.

Mencionemos, por último, sus posibles aplicaciones médicas. Así, por ejemplo, se supone que el rechazo observado en implantes artificiales (prótesis dentarias, caderas artificiales, marcapasos, etc.) está determinado por el grado de rugosidad superficial de la pieza que va a colocarse en el paciente. Estudios provisionales sobre implantes dentales de titanio parecen indicar que existe una correlación positiva entre el éxito clínico y la estructura superficial revelada por este nuevo tipo de microscopio. (Arturo Baró, Nicolás García y Rodolfo Miranda)

Una teoría de todo

Tras el importante éxito obtenido en el CERN con el descubrimiento de las partículas *Z* y *W,* piezas básicas para la teoría unificada de las interacciones débiles y electromagnéticas, queda abierto el camino hacia una descripción más sencilla de las fuerzas de la naturaleza. Las teorías locales cuánticas relativistas basadas en grupos de simetría no abelianos parecen ser las teorías "verdaderas", la senda que hay que seguir hacia la gran unificación. El primer paso en esta dirección consiste en unificar la teoría electrodébil con la cromodinámica cuántica, la teoría (también no abeliana, cuántica relativista y local) responsable de las interacciones entre los quarks y de las fuerzas nucleares fuertes (a cuyo cargo corren, entre otras cosas, la cohesión de los núcleos atómicos). La confirmación experimental de este nuevo paso, la detección de la desintegración del protón, no se ha producido todavía, pero es de esperar que se observe en un futuro próximo en

algunos de los experimentos que se están llevando a cabo. El que no se haya visto aún sólo supone un aumento de la vida media del protón por encima de los 10^{32} años, fácilmente acomodable en las teorías.

El problema más grave que se encuentra en el camino hacia la total unificación de las fuerzas de la naturaleza reside en la imposibilidad de encajar la fuerza gravitacional. Dejando de lado el que las actuales teorías de gran unificación (de las fuerzas débiles, electromagnéticas y fuertes) necesiten todavía un número de parámetros excesivo, del orden de 20, cuyos valores deben ser introducidos *ad hoc* en la teoría, y olvidando tampoco que dichas teorías se basan en ciertos grupos de simetría determinados, sin que haya razón alguna que diga por qué la naturaleza elige estos grupos y no otros, no parece fácil que se logre una descripción conjunta de estas interacciones con la fuerza gravitacional. Hasta ahora todos los intentos han fallado y más bien parece que el problema no tiene solución.

El camino inverso, partir de la teoría de la gravitación e intentar añadirle las otras interacciones, tampoco parece demasiado prometedor y hasta ahora ni siquiera se ha logrado una teoría cuántica coherente de la gravitación.

Recientemente, quizás debido a una ausencia de nuevos datos experimentales, y manteniéndose a la espera de los resultados que aporten los aceleradores que se están construyendo, los físicos han vuelto su atención hacia un nuevo tipo de teorías. Si hasta ahora la teoría cuántica de campos para objetos puntuales no ha permitido dar respuesta (a pesar de sus muchos e indiscutibles éxitos) a las cuestiones más profundas, ¿por qué no pensar en objetos extensos? Los más sencillos serían objetos en forma de cuerdas. De hecho, en la década de los años setenta se formularon teorías de cuerdas para desentrañar las interacciones entre los hadrones, cuando se consideraba que éstos tenían un carácter de piezas más fundamentales. Los éxitos ligados a la idea de que las hadrones no eran más que objetos formados por partes más elementales, los quarks, junto con los problemas de las teorías de cuerdas que debían formularse en espacios de 26 dimensiones, llevaron a desechar las teorías de cuerdas en favor de las teorías de aforo no abelianas que parecían acomodarse mejor al mundo real.

Las teorías de cuerdas han resurgido en los nuevos marcos teóricos de las supersimetrías y de las teorías de tipo Kaluza-Klein, ya que ofrecen algunas ventajas: se trata de teorías muy determinadas (en oposición a una elección arbitraria de algún grupo de simetría) y contienen necesariamente la interacción gravitacional.

Las teorías supersimétricas constituyen las únicas teorías capaces de ampliar no trivialmente la simetría del grupo de Poincaré y han recabado la atención en los últimos años por presentar algunas características interesantes: tratamiento igualitario de los fermiones y los bosones, mayor convergencia de las integrales con lo que desaparece la necesidad de ajustar los parámetros de la teoría de manera excesiva y arbitraria, etcétera. Incluso puede ser que se hayan obtenido indicaciones experimentales de alguna partícula supersimétrica, las nuevas partículas que la teoría predice y cuya elevada masa ha sido la causa de que hayan pasado desapercibidas hasta ahora.

La teoría de Kaluza y Klein es, por el contrario, una vieja teoría formulada por estos autores para unificar, en un contexto no cuántico, el electromagnetismo y la gravitación: se parte de un espacio de cinco dimensiones; de las cuales, una se "compactifica" a un radio suficientemente pequeño y da lugar a la carga eléctrica y, las otras cuatro, constituyen el espacio-tiempo ordinario.

Las teorías de supercuerdas de moda consisten en la formulación de teorías cuánticas de campos para supercuerdas, objetos extensos descritos por sus coordenadas en un superespacio (compuesto de coordenadas normales y de coordenadas espinoriales). Ello es posible en un espacio de 10 o de 26 dimensiones, ya sea con cuerdas abiertas o cerradas y pudiéndose eliminar los taquiones de la teoría, e implica necesariamente la presencia de una partícula de espín dos, el gravitón, responsable de las fuerzas gravitacionales.

Hasta ahora se han formulado unas pocas teorías de supercuerdas, siendo quizá la más esperanzadora la teoría llamada de la cuerda "heterótica". Muchos físicos consideran que, si bien no se conocen las normas para escribir todas las teorías posibles, las peculiaridades que deben satisfacer las teorías son tan restrictivas que se limitará mucho su número al exigir la finitud de la teoría y la ausencia de anomalías.

No es que el trabajo esté acabado: se ignora cómo compactificar las dimensiones adicionales, ni qué sentido tienen dichas dimensiones, ni cuál es el tamaño de la compactificación. Sin embargo, cada día gana adeptos la idea de que estos problemas se irán solucionando y de que se llegará a poder formular "una teoría de todo". (Ramón Pascual)

El vacío clásico

No lo está. Aunque eliminemos de una zona del espacio toda la materia y todas las radiaciones térmicas, campos electromagnéticos característicos seguirán llenando el vacío de la física clásica

Timothy H. Boyer

Aristóletes y sus seguidores sostenían que ninguna región del espacio podía estar vacía del todo. Esta concepción de que "la naturaleza tiene aversión al vacío y está libre de él" ("natura abhorret vacuum") fue abandonada en la revolución científica del siglo XVII. Por ironía del destino, la física moderna ha llegado a sostener una concepción similar a la del estagirita. Hoy no se discute la posibilidad, al menos en principio, de vaciar de toda materia ordinaria una región del espacio. Sin embargo, en la concepción moderna, una región de vacío dista mucho de estarlo o de carecer de rasgos conformantes. Tiene una estructura compleja, que ninguno de los medios imaginables puede eliminar.

Las frases anteriores tienen un resabio innegable de paradoja y acertijo. Si el vacío (*vacuum*, en latín) no lo está, ¿por qué denominarlo así? En nuestros días, los físicos llaman vacío a aquello que queda en una zona del espacio después de haberla librado de cuanto es posible extraerle por medios experimentales. El vacío o *vacuum* es aquel al que puede llegarse experimentalmente. Es obvio que el primer paso para obtener una región de vacío consistirá en sacar toda la materia visible, verbigracia, sólidos y líquidos. Los gases también se han de extraer. A pesar de haber retirado toda la materia, el espacio no está, con todo, vacío: continúa ocupado por radiaciones electromagnéticas. Parte de la radiación es térmica, y se la puede eliminar enfriando; pero otra parte de la radiación tiene un origen algo más sutil. Aunque se pudiera bajar la temperatura de un vacío a la del cero absoluto, seguiría reteniendo cierto tipo de ondas electromagnéticas fluctuantes. Esta radiación residual, a la que se ha empezado a prestar atención en estos últimos años, es una característica inherente del vacío, y no puede suprimirse.

Una exposición completa de la teoría contemporánea del vacío debería incluir las nociones de la mecánica cuántica que, por cierto, son un tanto sorprendentes. Por ejemplo, sería necesario describir la creación espontánea de materia y antimateria a partir del vacío. Sin embargo, algunas de las propiedades notables del vacío no dependen en lo más mínimo de la lógica propia de la teoría cuántica, y se las puede entender cabalmente en el marco de una descripción clásica (es decir, una descripción que no tiene en cuenta los efectos cuánticos). Así pues, trataré el tema del vacío sin salirme del marco de la física clásica. Pero no se crean, incluso en el mundo, más sencillo, de la física clásica el vacío es ya suficientemente extraño.

Descubrimiento del vacío

La doctrina aristotélica, que sostenía la imposiblidad física del vacío, quedó arrumbada en el siglo XVII. El hecho decisivo fue la invención del barómetro, en 1644, por Evangelista Torricelli, que había sido secretario de Galileo. Torricelli, después de llenar con mercurio un tubo de cristal cerrado por un extremo, le dio la vuelta introduciendo el extremo abierto del tubo en una cubeta, que también contenía mercurio. La columna de líquido descendió hasta una altura de unos 76 centímetros sobre el nivel del mercurio de la cubeta, dejando un espacio en lo alto del tubo. Era patente que ese espacio no contenía ninguna materia visible. Torricelli propuso que no contenía tampoco ningún gas y, por tanto, era un vacío. Se desencadenó una viva controversia entre los aristotélicos y quienes creían que Torricelli había creado un vacío genuino. Pocos años después, Blaise Pascal supervisó una serie de ingeniosos experimentos, encaminados todos ellos a confirmar la hipótesis de Torricelli.

En las décadas siguientes se pusieron de moda los experimentos con el vacío. La exhibición más célebre fue la que dirigió Otto von Guericke, alcalde de Magdeburg, quien construyó una esfera con dos hemisferios de cobre, y desalojó el espacio interior. Dos recuas de ocho caballos de tiro cada una no pudieron separar los dos hemisferios. Otros experimentos de la época fueron menos espectaculares pero, quizá, proporcionaron mayor información. Entre otras cosas, posibilitaron que se descubriera que la luz se transmitía a través del vacío, aunque no el sonido.

La concepción del vacío vuelve a cambiar en el siglo XIX. Un experimento mental, realizado con un imaginario



1. HEMISFERIOS DE MAGDEBURG, construidos por Otto von Guericke, en 1654; muestran la existencia del vacío. Una vez adosados por el ecuador y sacado el aire de su interior, dos tiros de ocho caballos cada uno no pudieron separarlos. El aparato está en el Deutsches Museum de Munich.

aparato ideal, puede ilustrar la naturaleza del cambio.

Imaginemos un émbolo y un cilindro tan perfectamente acoplados que el primero puede moverse libremente, sin dejar además ninguna rendija por donde pudiera pasar algo. En un primer momento, el émbolo está pegado al fondo del cilindro y, por tanto, no existe ningún hueco o espacio libre. Cuando se aplica una fuerza al émbolo que lo desplaza venciendo la presión del aire exterior, el espacio formado entre el émbolo y el fondo del cilindro es una región de vacío. Si soltamos inmediatamente el émbolo, éste retrocede al interior del cilindro desapareciendo el vacío. Pero si tiramos del émbolo y lo mantenemos en dicha posición durante cierto tiempo a la temperatura ambiente, el resultado es muy otro. La presión del aire exterior sigue empujando al émbolo, tendiendo a restablecer la situación primitiva. Sin embargo, el émbolo no llega a tocar el fondo del cilindro, ni siquiera aplicándole una fuerza adicional. Algo hay dentro del cilindro. Lo que parecía ser un espacio vacío no lo es después de retener el émbolo cierto tiempo.

Los físicos del siglo XIX estaban en situación de explicar resultado tan sorprendente. Mientras el émbolo se hallaba separado, las paredes del cilindro emitían radiación térmica en la región de vacío. Al forzar al émbolo a volver a su posición original, se comprime la radiación. La radiación térmica reacciona a la compresión de forma muy semejante a como lo hace un gas: aumentan su presión y su temperatura. Por tanto, la radiación comprimida ejerce una fuerza que se opone a la reinserción del émbolo. El émbolo y la pared del fondo del cilindro podrían volver a ponerse en contacto sólo si aguardáramos lo suficiente para que la radiación de temperatura más alta la reabsorbieran las paredes del cilindro.

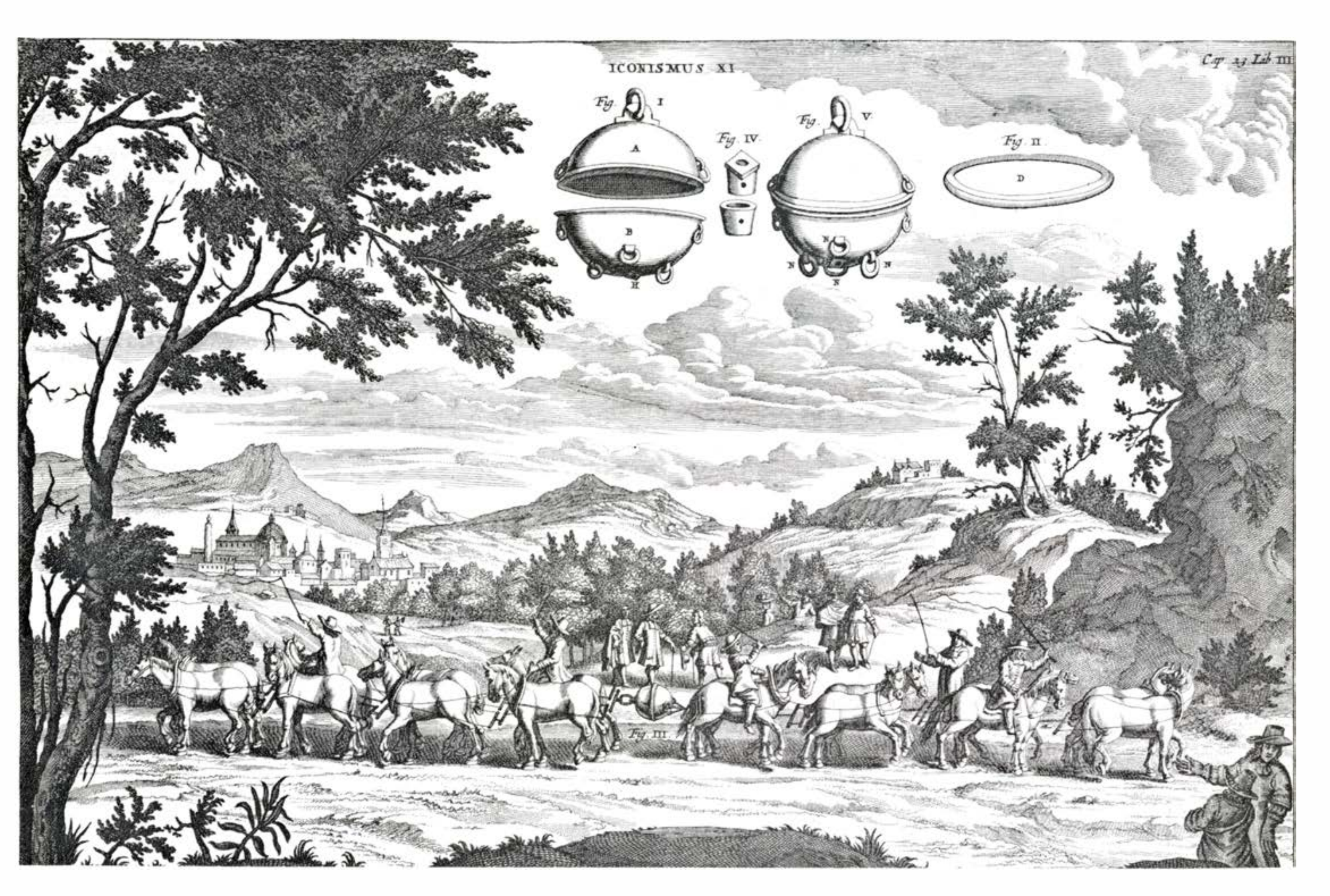
El espectro térmico

La forma de radiación térmica está íntimamente relacionada con la estructura del vacío en la física clásica. De lo dicho hasta ahora no se desprende que debiera ser así, y la verdad es que los físicos del siglo XIX desconocían dicha conexión.

La radiación térmica consiste en campos electromagnéticos que fluctúan de la manera más aleatoria posible. Paradójicamente, ese azar total otorga a la radiación una gran regularidad estadística. En condiciones de equilibrio térmico, en el que la temperatura es uniforme en todos los puntos, la radiación es homogénea e isótropa: sus propiedades son las mismas en todos y cada uno de los puntos del espacio y en todas las direcciones. Un instrumento que fuera capaz de medir las propiedades de la radiación daría la misma lectura, cualquiera que fuera el lugar donde estuviera emplazado y cualquiera que fuera su dirección.

La magnitud física que determina el carácter de la radiación térmica es su temperatura. En 1879 el físico austríaco Josef Stefan investigó la densidad total de energía de la radiación térmica (es decir, la energía por unidad de volumen); apoyándose en experimentos previos, sugirió que la densidad de energía variase con la cuarta potencia de la temperatura absoluta. Cinco años después, Ludwig Boltzmann, discípulo suyo, halló, a través del análisis teórico, esa misma relación.

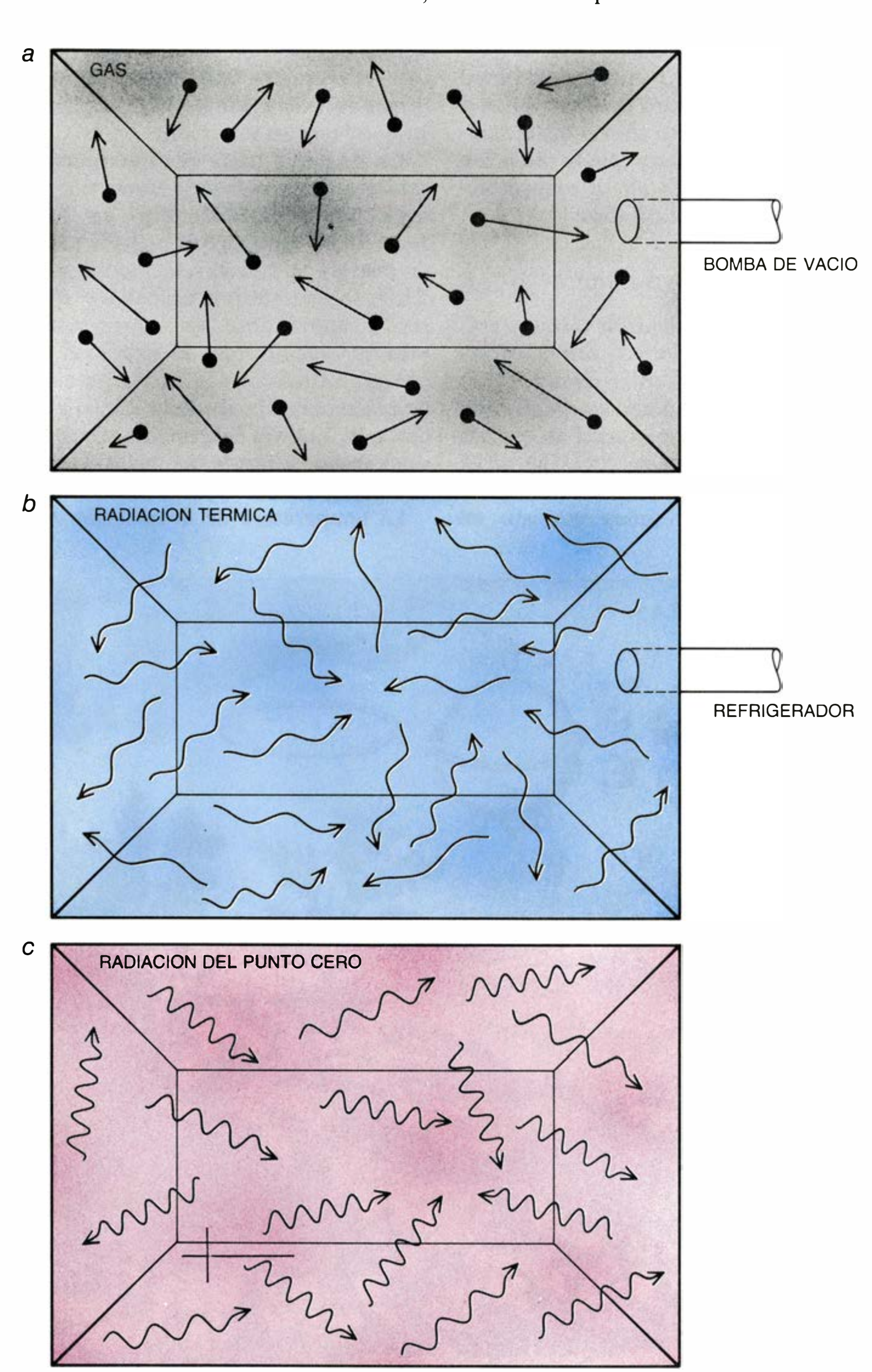
La temperatura de la radiación tér-



mica no sólo determina su densidad total de energía sino también su espectro, es decir, la curva que caracteriza la cuantía de energía radiante en cada frecuencia. El efecto de la temperatura sobre el espectro térmico nos es familiar por experiencia cotidiana; al calentar un objeto, primero se torna rojo y después blanco, o incluso azul, a medida que predominan en el espectro frecuencias cada vez más altas. Con todo, el espectro térmico no es monocromático; un atizador al rojo vivo emite radiaciones más vivas y abundantes en las frecuencias que corresponden a la luz roja, pero despide también menores cantidades de radiación en las otras frecuencias, en las más altas y en las más bajas.

La configuración del espectro térmico y su relación con la temperatura fue estudiada experimentalmente a finales del siglo XIX, pero los intentos por formular una explicación teórica coherente sólo tuvieron un éxito limitado. Se pretendía hallar una expresión matemática que expresara la intensidad de la radiación en función de la frecuencia y de la temperatura. En otras palabras, para una temperatura dada, la expresión debía predecir la intensidad de la radiación que se mediría en una frecuencia determinada.

El físico alemán Wilhelm Wien ofreció, en 1893, un refinado análisis clásico del espectro térmico. Basó su análisis en un experimento mental muy parecido al descrito antes, añadiendo la condición de que el cilindro estuviera perfectamente aislado, de manera que no pudiera ganar ni perder calor. Wien calculó qué cambio produciría en el espectro una variación infinitesimal del volumen en el interior del cilindro. A partir de este cálculo, dedujo que la expresión matemática que describía al espectro había de tener dos factores que, multiplicados, dieran la intensidad para una frecuencia y temperatura determinadas. Uno de los factores era el cubo de la frecuencia; el otro, una función de la temperatura absoluta dividida por la frecuencia. Pero Wien no pudo establecer la forma precisa de la función. (Aunque la propuso, pronto se vio que no era la correcta.)



2. PRODUCCION DEL VACIO: sigue las etapas del desarrollo histórico de las concepciones del mismo. En el siglo XVII (*a*) pensábase que se podía crear un espacio enteramente vacío desalojando toda la materia y, en concreto, todos los gases. En el siglo XIX (*b*), resultaba obvio que dicho espacio aún conservaba radiación térmica, aunque parecía que se la podía eliminar por enfriamiento. Más tarde, tanto la teoría como los experimentos han mostrado que en el vacío se da una radiación que no es térmica (*c*), y que existiría aunque se alcanzara la temperatura del cero absoluto. Se la llama radiación del punto cero.

Teoría clásica del electrón

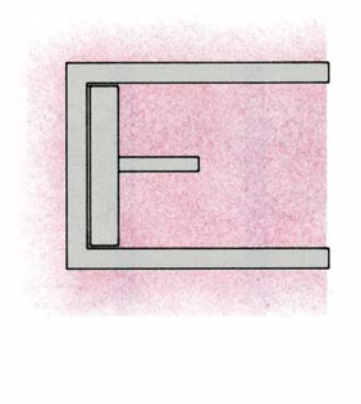
La función matemática que describía el espectro térmico fue propuesta por Max Planck en 1900. Planck hizo ver que, para comprender la radiación térmica, era necesario introducir una nueva constante fundamental (llamada hoy en su honor constante de Planck), que tiene un valor de $6,626 \times 10^{-27}$ erg-segundo. En su afán por hacer comprensible la función del espectro térmico, Planck puso los cimientos de la teoría cuántica. Con todo, el inicio de la física cuántica no señaló el final de la vida de la física clásica.

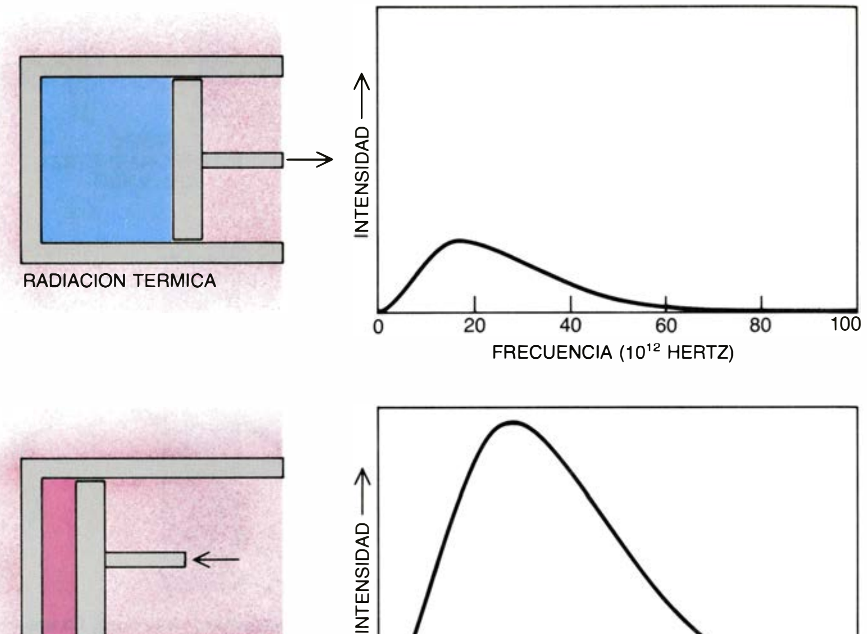
La propuesta de Stefan y Boltzmann, según la cual la densidad total de energía de la radiación térmica es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura, implica que la densidad de energía es nula a la temperatura del cero absoluto. La radiación térmica desaparece sencillamente a la temperatura de cero absoluto. La posibilidad de eliminar toda radiación térmica llevó a una concepción del vacío clásico que ampliaba la introducida en el siglo XVII. Un vacío perfecto seguía siendo una región de espacio totalmente vacía; mas, para alcanzar dicho estado, debía supri-

mirse no sólo toda la materia visible y todos los gases, sino también todas las radiaciones electromagnéticas. Este último requisito se podía lograr, en principio, enfriando la región hasta el cero absoluto.

La concepción del vacío de la física clásica se insertó en la teoría física fundamental de la época, a la que se ha denominado después teoría clásica del electrón. De acuerdo con la misma, los electrones constituirían partículas puntuales, cuyas únicas propiedades son la masa y la carga eléctrica. Los campos magnético y eléctrico pueden poner a los electrones en movimiento y, a su vez, dicho movimiento origina tales campos. (Por ejemplo, un electrón oscilante radia ondas electromagnéticas en la frecuencia de oscilación.) Las interacciones entre partículas y campos se explican por las leyes del movimiento de Newton y por las ecuaciones del electromagnetismo de James Clerk Maxwell. Se han de establecer, además, algunas condiciones iniciales o restrictivas, si la teoría ha de posibilitar predicciones precisas. Las ecuaciones de Maxwell explican cómo un campo electromagnético cambia de un punto a otro y de un momento a otro; mas para calcular el valor real y actual del campo se han de conocer los valores iniciales, o limitativos, del campo, los cuales constituyen el punto de partida para todos los cambios posteriores.

Por la elección de condiciones iniciales la naturaleza del vacío entra a formar parte de la teoría clásica del electrón. Puesto que en la concepción del siglo XIX el vacío lo estaba de toda radiación, las condiciones iniciales impuestas a las ecuaciones de Maxwell eran la ausencia de radiaciones eléctrica y magnética. Dicho de una forma un tanto imprecisa, la visión del siglo XIX de la teoría clásica del electrón presuponía que en algún momento del lejano pasado el universo estaba formado por materia (electrones), pero sin ninguna radiación. Todas las radiaciones electromagnéticas se originaban de la aceleración de las cargas eléctricas.



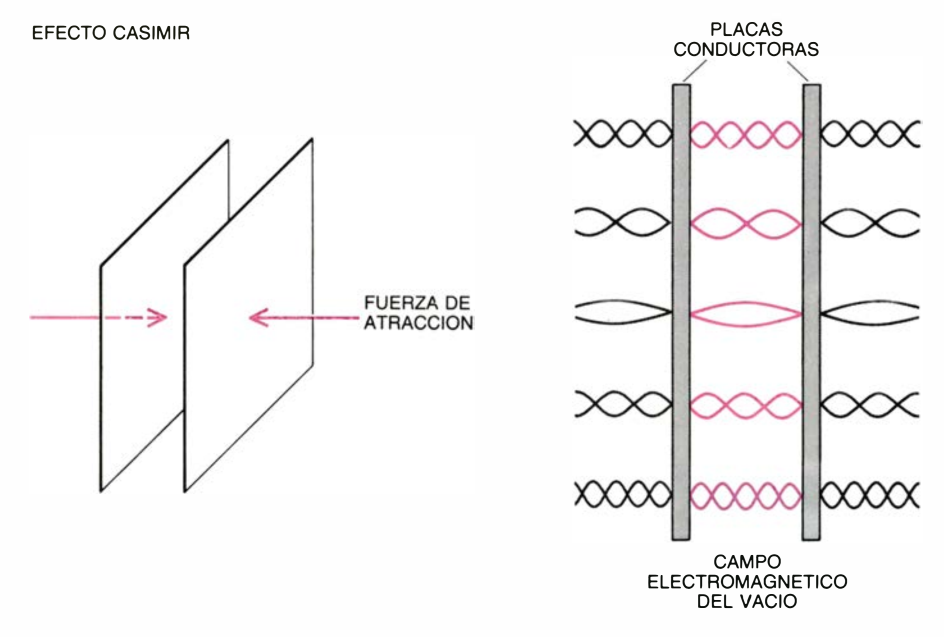


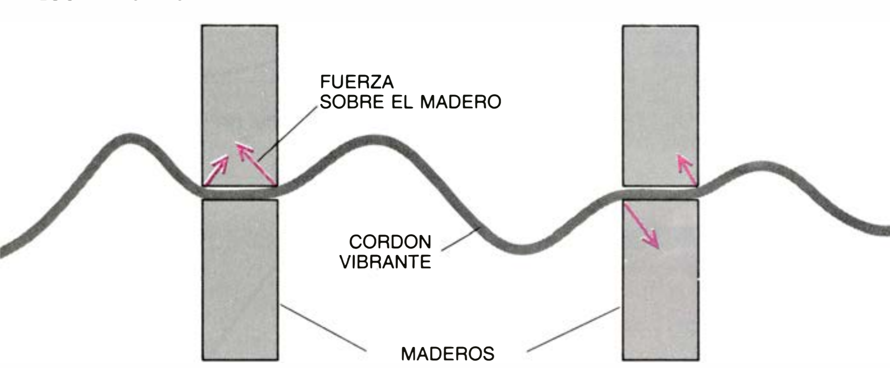
3. EMBOLO Y CILINDRO IDEALES, elementos del aparato de un experimento mental, que pone de manifiesto la presencia de radiación térmica. Al comienzo, el émbolo llega hasta el fondo del cilindro, sin dejar ningún espacio libre; después se le saca un trecho y se le mantiene en esa posición durante cierto tiempo, a la temperatura ambiente. Podría pensarse que el espacio encerrado es un vacío y, sin embargo, el émbolo, una vez dejado en libertad, no vuelve a su posición inicial; de hecho, ni siquiera aplicándole una fuerza adicional se puede lograr que torne a tocar la pared del fondo. Mientras se mantiene el émbolo separado, las paredes de la cavidad emiten radiación térmica, cuyo espectro está determinado por la temperatura. Al intentar reinsertar el émbolo se comprime la radiación, aumenta su temperatura y cambia, por consiguiente, su espectro. La radiación más caliente se opone entonces a la compresión.

El efecto Casimir

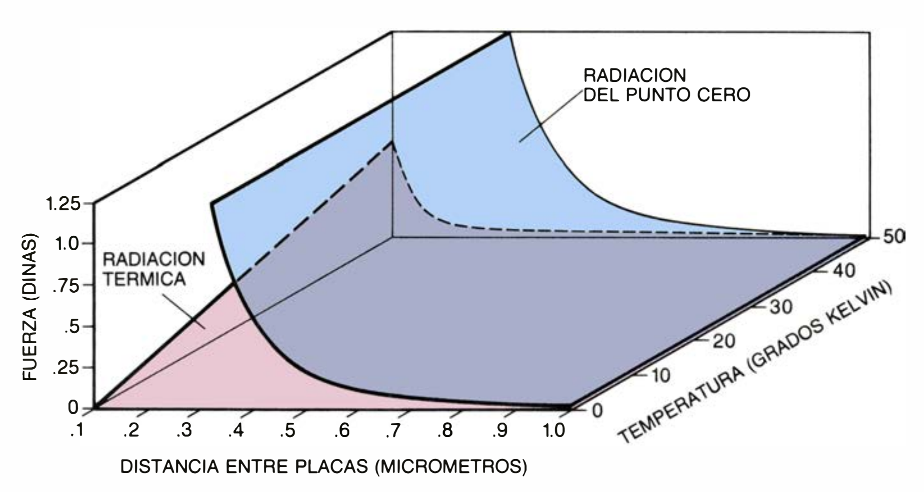
La teoría clásica del electrón sigue siendo un campo posible de investigación, aunque en nuestros días se ha remodelado. La necesidad de una revisión se ve fácilmente a partir de un experimento propuesto en 1948 por Hendrik B.G. Casimir, de los laboratorios de investigación de la compañía Philips (Holanda). Casimir analizó las fuerzas que actuarían sobre dos placas paralelas y conductoras de la electricidad, colocadas en un vacío, próximas una a la otra. Si las placas se hallaran eléctricamente cargadas, las leyes de la electrostática elemental predecían la existencia de una fuerza entre ellas, pero Casimir consideró el caso de que las placas no estuvieran cargadas. Incluso en dicha hipótesis, de la radiación electromagnética que circunda las placas puede resultar una fuerza. El origen de dicha fuerza no se ve de inmediato, pero una analogía mecánica ayuda a esclarecerlo.

Supongamos que se hace pasar ajustadamente un cordón liso por los agujeros de dos trozos de madera, tal como muestra la figura 4. El cordón no está anudado a los maderos y, por tanto, en reposo ni los aleja ni los acerca. Pero, si se hace vibrar transversalmente el segmento de cordón entre los trozos de madera, actúa una fuerza sobre los maderos y éstos tienden a separarse, deslizándose por el cordón. La fuerza se origina porque el movimiento transversal del cordón deja de propagarse en el punto en que toca a los maderos y, por tanto, las ondas del cordón se reflejan en ese punto. Cuando una onda se refleja, parte de su momento se transmite al reflector.





4. EFECTO CASIMIR, que prueba la existencia de campos electromagnéticos en el vacío. En una cámara de vacío se disponen, paralelas y muy próximas una de otra, dos placas metálicas. Por ser conductoras, las placas reflejan las ondas electromagnéticas; para que una onda se refleje ha de coincidir un nodo del campo eléctrico —un punto de amplitud eléctrica cero— con la superficie de la placa. La disposición resultante de las ondas origina una fuerza de atracción. Una analogía mecánica puede hacer comprensible, en parte, el origen de la fuerza. Si se hace vibrar un cordón que atraviesa, por sendos agujeros, dos trozos de madera, las ondas del cordón se reflejan en los agujeros y generan fuerzas sobre los maderos. En cada trozo de madera las fuerzas actúan en sentido opuesto, pero queda sin neutralizar una pequeña fuerza. Su intensidad y dirección dependen de la distancia entre los trozos de madera y el espectro.



5. LA FUERZA OBSERVADA EN EL EXPERIMENTO DE CASIMIR tiene dos componentes. A altas temperaturas, la radiación térmica origina una fuerza que es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al cubo de la distancia que media entre las placas. Esta fuerza desaparece en el cero absoluto, al igual que la propia radiación térmica. La fuerza asociada con la radiación del punto cero es independiente de la temperatura, e inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia que media entre las placas. Las fuerzas ilustradas en el gráfico corresponden a placas de un centímetro cuadrado de superficie; a temperaturas altas, la fuerza térmica constituye una buena aproximación.

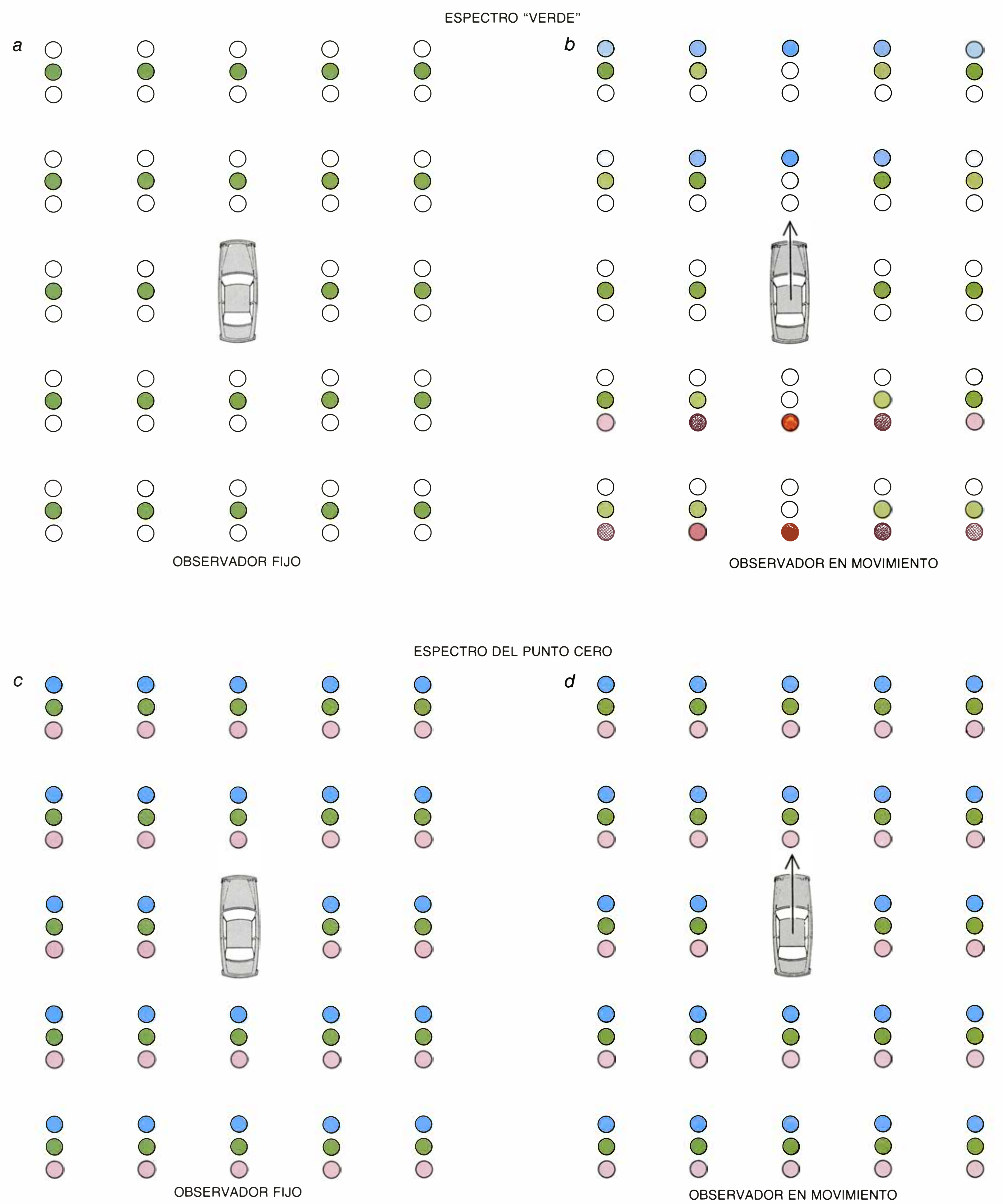
La situación del experimento propuesto por Casimir es semejante. Las placas de metal son los análogos de los trozos de madera; los campos de radiación magnética y eléctrica oscilantes corresponden al cordón que vibra. El análogo del agujero en la madera es el carácter conductor de las placas metálicas. Lo mismo que el trozo de madera refleja las ondas del cordón, un cuerpo conductor refleja las ondas electromagnéticas. En este caso hay radiación a ambos lados de cada placa y, por consiguiente, las fuerzas tienden a anularse. Pero no se anulan del todo; queda una pequeña fuerza residual. Esta fuerza es directamente proporcional al área de las placas, y depende, además, de la distancia entre ellas y del espectro de la radiación electromagnética fluctuante.

Hasta aquí el análisis es perfectamente coherente con la concepción del vacío del siglo XIX. La fuerza que actúa sobre las placas se atribuye a la fluctuante radiación térmica. Al bajar la temperatura al cero absoluto, desaparecerían tanto la radiación térmica como la fuerza entre las placas. Un experimento contradice esta predicción. En 1958 el físico holandés M.J. Sparnaay llevó a cabo una serie de experimentos basados en la propuesta de Casimir, y halló que la fuerza no tendía a cero cuando la radiación térmica se acerca a intensidades bajas. Lejos de tender a cero, quedaba una fuerza residual de atracción, que permanecería incluso en el cero absoluto.

Esta fuerza residual es directamente proporcional al área de las placas, e inversamente proporcional a la cuarta potencia de la distancia entre ellas; la constante de proporcionalidad es $1{,}3 \times \times 10^{-18}$ erg-centímetro. Aunque esta fuerza es pequeña, puede medirse si las placas están suficientemente próximas. Para placas de un centímetro cuadrado de área y una separación de 0,5 micrometros, la fuerza de Casimir equivale a un peso de 0,2 milígramos.

El espectro del punto cero

Sea cual sea el orden de magnitud del efecto Casimir, su sola existencia indica que el concepto de vacío clásico del siglo XIX encerraba algún error fundamental. Si hay que hacer compatible la teoría clásica con el experimento, entonces, incluso a la temperatura de cero, el vacío clásico no puede serlo del todo; ha de estar lleno de los campos electromagnéticos clásicos responsables de la fuerza de atracción que midió Sparnaay. A estos campos de vacío se



6. INVARIANCIA DE LORENTZ de la radiación del punto cero. Asegura la misma que el vacío lo captan igual observadores que se mueven por él a distintas velocidades, con tal que la velocidad de cada sujeto sea constante. La transformación de Lorentz pone en relación sistemas de referencia que proceden a distintas velocidades; para que la radiación sea invariante respecto de la transformación de Lorentz su espectro no debe cambiar con la transformación. El efecto del movimiento sobre el espectro se aclara con el caso de un observador rodeado de unas señales de tráfico especiales, que siempre indican la intensidad de la radiación del punto cero en tres frecuencias distintas; a saber: la del rojo, verde y azul. Supongamos que un observador, en reposo respecto a las señales, las ve todas verdes (*a*), dando a entender que toda la radiación del punto cero se concentra en la zona verde del espectro electromagnético. Si el observador se pone en movimiento (*b*), la configuración cambia a causa del efecto Doppler: las señales frontales las ve azules y las que deja atrás, rojas. Además, la transformación de Lorentz hace que las señales que se le acercan parezcan más brillantes, y aquellas otras que se le alejan más mates. Sólo una forma espectral tiene la propiedad de invariancia de Lorentz: la intensidad debe ser proporcional al cubo de la frecuencia. Si la iluminación de las señales de tráfico satisface esta condición, entonces ven la misma configuración un observador en reposo (*c*) y un observador en movimiento (*d*).

los denomina ahora radiación electromagnética clásica del punto cero.

¿Cuáles son las características de la radiación del punto cero en el vacío clásico? Muchas de ellas se pueden deducir del hecho de que dicha radiación se dé en un vacío: se han de ajustar a las ideas fundamentales admitidas acerca de la naturaleza de éste. Por ejemplo, parece esencial afirmar que el vacío no define ningún punto o dirección singulares, que no fija puntos de referencia ni en el espacio ni en el tiempo; se mostraría el mismo en todas las posiciones y direcciones. Por consiguiente, la radiación del punto cero, al igual que la radiación térmica, ha de ser homogénea e isótropa. En segundo lugar, el vacío no establecería ninguna velocidad singular en el espacio; aparecería igual a cualquier par de observadores, independientemente de la velocidad de uno con respecto al otro, siempre que dicha velocidad sea constante. Se suele expresar este último requisito diciendo que la radiación del punto cero ha de ser invariante respecto de la transformación de Lorentz. (La transformación de Lorentz, así denominada en honor del físico holandés H.A. Lorentz, permite pasar de un sistema de referencia inercial —es decir, de velocidad constante— a otro; considerando que la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia.)

El requisito de la invariancia de Lorentz es una restricción importante. Un pasajero puede que dude, por un momento, de si es su tren el que se mueve con relación a la tierra o el que está en la vía contigua, pero puede salir de dudas con sólo dirigir su mirada a un punto que se sabe fijo. La invariancia de Lorentz implica que en el vacío no existen tales puntos fijos, y que ningún experimento podría revelar jamás la velocidad de un observador respecto al marco de la radiación del punto cero. Para satisfacer esta condición, el espectro de la radiación debe reunir unas propiedades muy determinadas.

Supongamos de momento que la radiación del punto cero, tal como la percibe un observador, estuviera toda ella en la zona del espectro electromagnético que corresponde al de la luz verde. Cualquiera que sea el lugar en que se halle el observador y cualquiera que sea la dirección en que mire, le parecerá que el vacío está lleno de una radiación verde uniforme. Para este observador, dicho espectro satisface los requisitos de homogeneidad e isotropía; pero supongamos ahora que hay otro observador que se mueve hacia el primero a velocidad constante. Por el efecto Doppler, el observador en movimiento vería la radiación en frente suyo, hacia la que se dirige, corrida hacia el extremo azul del espectro, y la radiación a sus espaldas, de la que se aleja, corrida hacia el extremo del rojo. La transformación de Lorentz altera, además, la intensidad de la radiación: sería más brillante la frontal, y mate la que deja a sus espaldas. Por consiguiente, la radiación no les parece igual a los dos observadores; es isótropa para uno, mas no para el otro.

Resulta que sólo hay una forma posible para el espectro del punto cero, si la radiación ha de ser invariante respecto a la transformación de Lorentz. Para cualquier frecuencia, la intensidad ha de ser proporcional al cubo de esa frecuencia. Un espectro definido por dicha curva cúbica es idéntico para todos los observadores no-acelerados, cualquiera que sea su velocidad; es el único espectro con esta propiedad.

Se podría objetar a la forma cúbica

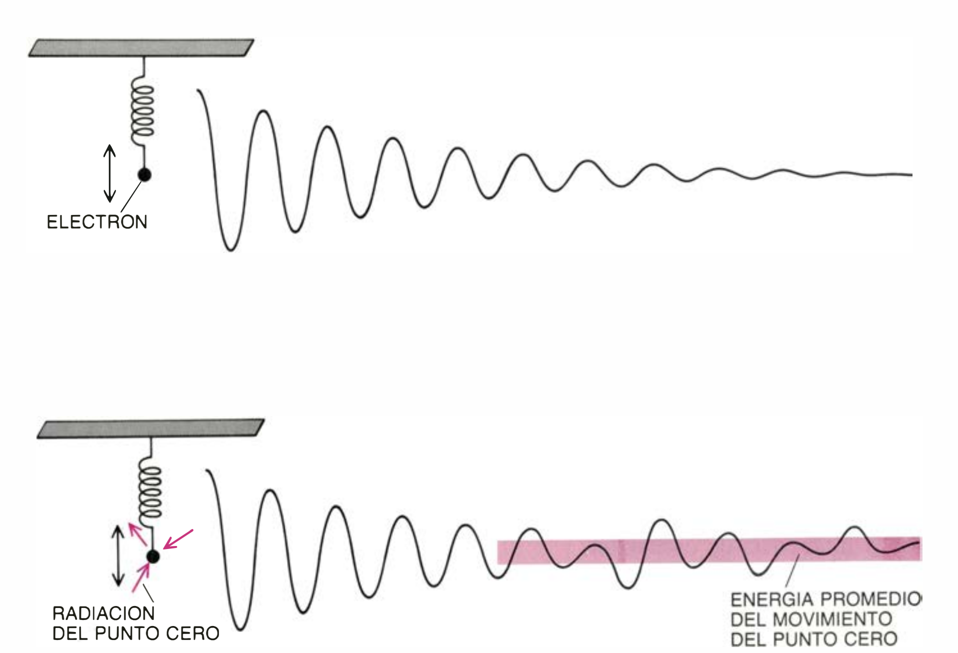
7. ESPECTRO DEL PUNTO CERO. Es independiente de la velocidad del observador, porque las variaciones en la intensidad y en la frecuencia se compensan. Cuando un observador se acerca a una fuente de radiación, todas las frecuencias se corren hacia valores más altos y se incrementan todas las intensidades; si se aleja de la fuente, se producen los efectos contrarios. Por tanto, un espectro que, para un observador parado, tiene una cresta en la zona del verde, tendrá una cresta azul algo mayor para otro que se acerque, y una cresta roja algo menor para uno que se aleja. La curva cúbica, que describe el espectro del punto cero, equilibra las variaciones de frecuencia e intensidad. Una luz que aparece verde en el sistema de referencia estacionario se torna azul para el que se acerca, pero su intensidad es igual a la de la luz azul que ve un observador en reposo. Por el mismo motivo, la luz verde la percibe un observador que se aleja corrida hacia las frecuencias del rojo, pero su intensidad disminuye en la misma proporción.

del espectro del punto cero lo siguiente: puesto que la intensidad de la radiación aumenta incesantemente en las frecuencias más altas, el espectro predice una densidad infinita de energía para el vacío. Tal predicción se hubiera considerado en el siglo XIX un fallo insuperable, pero en el XX, desde la década de los cuarenta, los infinitos han aparecido en varios campos de la física y se han desarrollado métodos para abordarlos. En este caso, la energía infinita se refiere tan sólo al ámbito de las fuerzas gravitacionales. Todos los otros cálculos se basan en variaciones o diferencias de energía que son siempre finitas.

Si la radiación del punto cero penetra y se desparrama por todo el universo, podría suponerse que se daría a conocer en fenómenos menos sutiles que el efecto Casimir. Cabría pensar, por ejemplo, que modificaría el resultado del experimento del émbolo y el cilindro, oponiéndose a la inserción del émbolo, después incluso de que hubiera desaparecido toda radiación térmica.

Pero los análisis muestran otra cosa. En condiciones de equilibrio, es decir, cuando no actúa ninguna fuerza externa sobre el émbolo, hay radiación tanto fuera como dentro del cilindro, y las presiones de radiación que se ejercen sobre el émbolo están compensadas. Esta compensación afecta a la radiación térmica y a la del punto cero. Al impeler el émbolo dentro del cilindro, se comprime la radiación. El cálculo de la variación del espectro como resultado de un cambio de volumen, hecho por Wien, da a entender que la radiación térmica se opone a la compresión; aumenta la temperatura y ejerce una presión mayor sobre el émbolo. Pero si realizamos un análisis similar para la radiación del punto cero, el resultado será distinto: el espectro del punto cero no reacciona en lo más mínimo a la compresión. De hecho, el único espectro que tiene esta singular propiedad es el descrito por una curva cúbica.

El otro experimento en el que se habría de contrastar el espectro cúbico del punto cero es el propio efecto Casimir. Un cálculo teórico basado en el espectro predice una fuerza entre las placas directamente proporcional a su área, e inversamente proporcional a la cuarta potencia de su separación, en consonancia con los resultados de Sparnaay. Se puede mostrar, también en este caso, que es el único espectro que permite esta predicción; ninguna otra curva espectral admite una dependencia inversa a la cuarta potencia de la distancia.



8. EL OSCILADOR ARMONICO muestra los efectos de la radiación del punto cero sobre la materia. El oscilador está compuesto por un electrón unido a un muelle que se supone ideal y sin rozamiento. Al ponerlo en movimiento, el electrón oscila en torno a su punto de equilibrio, emitiendo una radiación electromagnética en la frecuencia de oscilación. La radiación disipa energía; por consiguiente, si llegara a faltar la radiación del punto cero y la temperatura alcanzara el cero absoluto, el electrón acabaría por pararse. En realidad, la radiación del punto cero comunica impulsos aleatorios al electrón, de manera que éste nunca llega a pararse del todo. La radiación del punto cero comunica al oscilador una energía promedio igual a la frecuencia de oscilación multiplicada por un medio de la constante de Planck.

La afirmación de que un espectro descrito por una curva cúbica es único sólo se refiere al tipo de curva; en realidad, hay infinitas curvas que tienen la misma forma, si bien a diferentes escalas. En todas ellas la intensidad de la radiación es proporcional al cubo de la frecuencia, pero la magnitud de la intensidad de cada espectro depende de una constante, que establece la escala de la curva.

Nueva teoría clásica del electrón

El valor de esta constante no se puede calcular teóricamente, pero las mediciones, que obtuvo Sparnaay, de la fuerza en el efecto Casimir permite determinar experimentalmente este valor. Tras ciertos cálculos algebraicos previos, se halló que el valor de la constante era de $3{,}3 \times 10^{-27}$ erg/segundo, una magnitud que es igual a un medio de la constante de Planck. Así pues, la constante de Planck, sello y distintivo de toda la física cuántica, aparece en un contexto meramente clásico.

La introducción de la radiación clásica del punto cero en el vacío impone un cambio importante en la teoría clásica del electrón. La versión revisada de la teoría sigue teniendo por fundamento las leyes del movimiento de Newton para los electrones, y las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético; pero deben cambiarse las condiciones restrictivas, o iniciales, impuestas a las ecuaciones de Maxwell. El vacío ya no lo está de campos electromagnéticos; ahora lo ocupan campos fluctuantes al azar que tienen el espectro del punto cero. A la teoría modificada se la llama teoría clásica del electrón con radiación electromagnética clásica del punto cero; nombre que suele abreviarse por el de electrodinámica estocástica.

La variación de las condiciones iniciales cambia las predicciones de la teoría. Se pueden comprender los cambios reflexionando sobre uno de los modelos preferidos de la física moderna: un oscilador armónico formado por un electrón unido a un muelle perfectamente elástico y sin ningún tipo de rozamiento. Se ha de incorporar este sistema mecánico imaginario al vacío clásico. Si se estira el muelle y a continuación se le suelta, el electrón oscilará en torno a su posición de equilibrio y emitirá una radiación electromagnética en la frecuencia de oscilación.

El oscilador armónico es un modelo adecuado porque es fácil calcular el movimiento del electrón. En la primera versión de la teoría clásica del electrón actúan sólo dos fuerzas sobre el electrón: la fuerza de recuperación del muelle y una fuerza de reacción que proviene de la emisión de radiación. Al

ser la fuerza de reacción de sentido contrario al movimiento del electrón, la teoría predice que las oscilaciones se irán amortiguando uniformemente, y el electrón acabará por pararse. Pero en la nueva versión de la teoría clásica del electrón, la radiación del punto cero ejerce una fuerza adicional sobre el electrón. La partícula cargada está constantemente golpeada por los campos, que fluctúan al azar, de la radiación del punto cero, de manera que no llega nunca a detenerse. Resulta que el oscilador armónico conserva una energía promedio relacionada con el espectro del punto cero, a saber, un medio de la constante de Planck multiplicado por la frecuencia de oscilación.

Hasta aquí se ha descrito el vacío clásico desde el punto de vista de un observador en reposo o que se mueve a velocidad constante. Las consecuencias de la radiación del punto cero guardan mayores sorpresas para un observador acelerado, es decir, para un observador cuya velocidad cambia de continuo en magnitud o dirección.

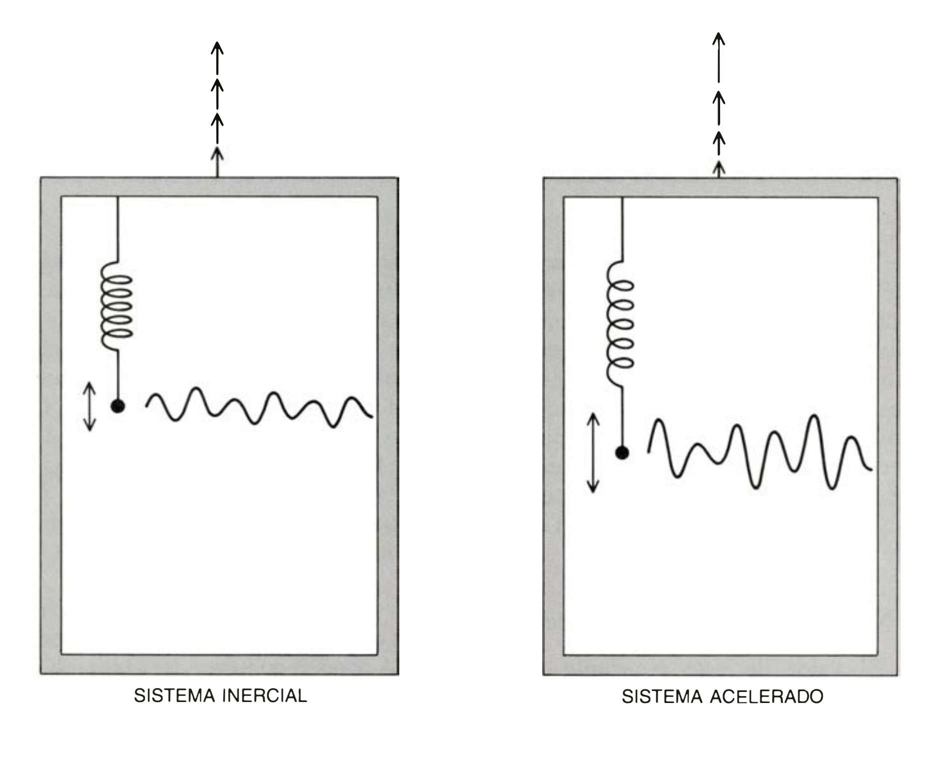
Efectos de la aceleración

Piénsese en un observador a bordo de un cohete que se acelera sin cesar respecto de un sistema de referencia que podemos considerar fijo, verbigracia, el de las estrellas lejanas. ¿A qué se asemejaría el vacío clásico que ve el observador a bordo del cohete? Para saberlo se ha de hacer una transformación matemática del sistema de referencia fijo al acelerado. La transformación de Lorentz relaciona sistemas a distintas velocidades, pero en este caso la situación reviste cierta complejidad, ya que la velocidad del observador acelerado cambia continuamente. Con todo, aplicando las transformaciones de Lorentz a un determinado intervalo de tiempo, se puede establecer el vacío observado desde el cohete.

Se podría sospechar que, para un observador acelerado, el espectro ya no sería isótropo y, en concreto, que se apreciaría cierta diferencia entre la percepción frontal y la que queda atrás. Se podría predecir, además, que el espectro iría cambiando mientras persistiera la aceleración. En realidad, el espectro sigue siendo homogéneo e isótropo y no se observa ninguna variación, siempre que la aceleración sea uniforme, es decir, mientras la variación de la aceleración por unidad de tiempo sea constante. Sin embargo, el espectro no es el que ve un observador no acelerado. Dada una frecuencia cualquiera, en el sistema acelerado la radiación es más intensa que en el sistema en reposo.

La forma del espectro electromagnético clásico que ve un observador acelerado no es, de inmediato, familiar a los físicos; pero se la puede interpretar analizando el movimiento de un oscilador armónico a bordo del cohete. La ecuación de movimiento del oscilador acelerado es muy parecida a la que vige en un sistema de referencia fijo. Con dos diferencias: la fuerza de reacción de la radiación tiene un nuevo término proporcional al cuadrado de la aceleración; y el oscilador está expuesto a un nuevo espectro de radiación aleatoria asociada a la aceleración. De estas variaciones resulta que la energía media supera a la energía asociada al movimiento del punto cero. En otras palabras, cuando un oscilador está acelerado, vibra más enérgicamente de lo que lo haría si estuviera en reposo en el vacío.

Para comprender el efecto de la aceleración sobre el oscilador armónico bueno será preguntarse qué espectro electromagnético nuevo se podría sumar a la radiación del punto cero para producir el movimiento adicional. Para responder a esta cuestión podemos valernos del principio de equivalencia, en el que Einstein fundamentó su teoría de la gravitación. El principio afirma que un observador instalado en un pequeño laboratorio sometido a un campo gravitacional hace exactamente las mismas mediciones que un observador alojado en un cohete acelerado. Se sabe que las leyes de la termodinámica vigen en un campo gravitacional. Por tanto, es de esperar, por el principio de



9. EFECTO DE LA ACELERACION en el vacío: cambia el espectro de la radiación observada. A la temperatura de cero absoluto, un oscilador armónico de un sistema de referencia en reposo, o que se mueve a velocidad uniforme, sólo está sometido a las oscilaciones del punto cero. En un sistema acelerado, el oscilador se comporta como si su temperatura fuera mayor que cero. (Esquemas de Gabor Kiss.)

equivalencia, que las leyes de la termodinámica estén vigentes en un cohete acelerado. Sólo hay, pues, un posible espectro de equilibrio que quepa sumar a la radiación del punto cero: la radiación adicional ha de tener un espectro térmico. Con cualquier otro tipo de espectro el oscilador no estaría en equilibrio térmico con su entorno y, por tanto, podría servir de fundamento de una máquina de movimiento continuo. Por este medio se llega a una importante conclusión: un sistema físico acelerado por el vacío tiene las mismas propiedades de equilibrio que un sistema sin acelerar inmerso en una radiación térmica a temperatura superior al cero absoluto.

La relación matemática que conecta aceleración y temperatura fue hallada hacia 1976 por William G. Unruh y P.C.W. Davies. El sorprendente espectro que ve un observador acelerado por el vacío es resultado de la suma de dos componentes. Una es la radiación del punto cero, la otra es el espectro de la radiación térmica deducido por Planck en 1900. Planck logró explicar la forma de dicha curva con tan sólo introducir algunas ideas de la mecánica cuántica; a lo que no se sentía muy inclinado e hizo con cierto disgusto. Sabemos ahora que se puede derivar la curva con un análisis estrictamente clásico de la radiación en el vacío.

De esta línea de investigación surge al menos otro resultado aún más fascinante. Si recurrimos de nuevo al principio de equivalencia, que relaciona a un observador en un campo gravitacional con un observador acelerado, concluiremos que en un campo gravitacional sólo se puede alcanzar una temperatura mínima. Este límite es absoluto, con independencia de las dificultades prácticas de lograr bajas temperaturas. En la superficie de la Tierra, el límite es de 4×10^{-20} grados Kelvin, que supera en mucho a las posibilidades de cualquiera de los refrigeradores existentes, pero que, con todo, es mayor que cero.

El descubrimiento de una conexión entre la radiación térmica y la estructura del vacío clásico revela una insospechada unidad en las leyes de la física, pero complica también nuestra concepción de lo que en el pasado se consideraba un mero espacio vacío. Incluso con su configuración de campos eléctricos y magnéticos en constante fluctuación, el vacío sigue siendo el estado más simple de la naturaleza. Pero este enunciado arroja, quizá, más luz sobre la sutileza del mundo que sobre la simplicidad del vacío.

Los vertebrados mesozoicos de Tailandia

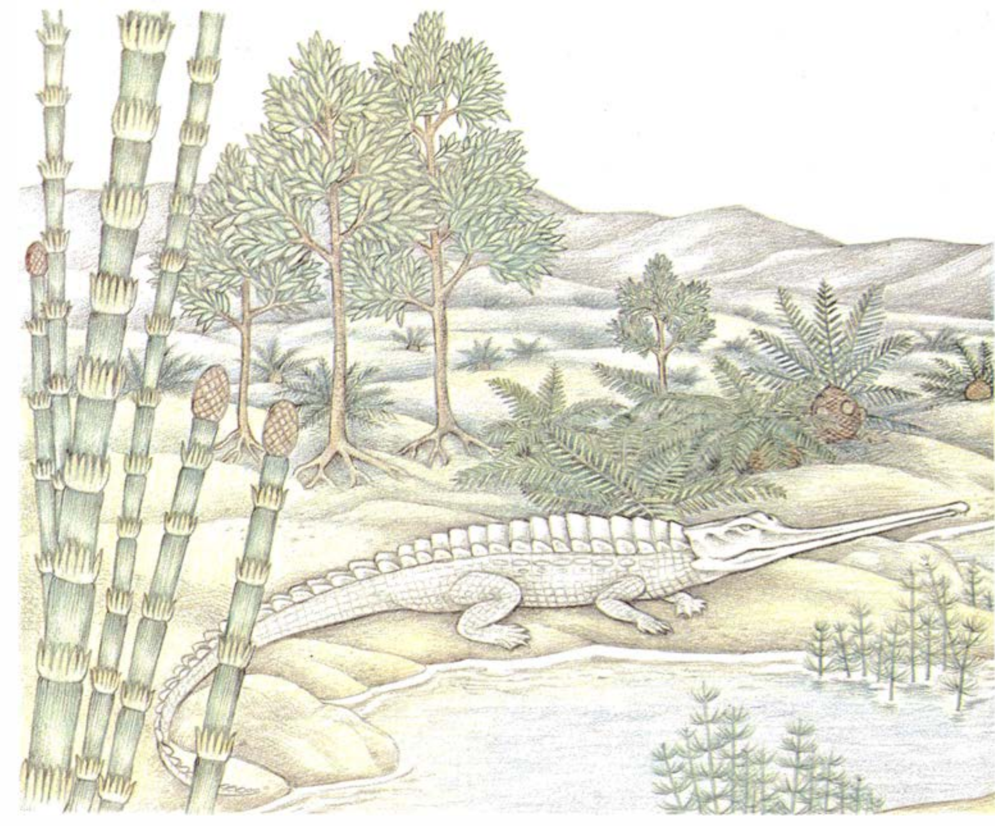
La región nordeste del país contiene un potente registro fósil que abarca más de 100 millones de años de evolución de los vertebrados. Contribuirá sin duda al esclarecimiento de la historia geológica del sudeste de Asia

Eric Buffetaut y Rucha Ingavat

Quien ande a la búsqueda de un lugar donde resulte fácil recolectar fósiles, probablemente no se le ocurra ir al sudeste de Asia. La latitud corresponde a un país tropical, los monzones dominan el clima y una exuberante vegetación cubre gran parte del suelo. A pesar de ello, los primeros investigadores que visitaron esa región lograron varios hallazgos. A fines del siglo pasado, el geólogo francés Henri Counillon encontró en Laos un cráneo de reptil parecido al de un mamífero. También en la década de los años 30 de este siglo, el geólogo francés Josué-Heilmann Hoffet recogió huesos de dinosaurio en otros puntos de Laos. Poco después se descubrían en Tailandia algunos dientes de reptil.

La situación es hoy del todo distinta: un equipo de la expedición franco-tailandesa ha recolectado en el nordeste de Tailandia importantes restos de peces, anfibios y reptiles de la era Mesozoica. Es ésa la época en la que dominaban los reptiles. Empezó hace 240 millones de años y terminó hace 65, con la expansión de los mamíferos. Con el apoyo de estos fósiles resulta posible reconstruir los cambios experimentados por las comunidades faunísticas dulceacuícolas y terrestres en esa parte del sudeste de Asia durante un intervalo de más de 100 millones de años. Los resultados pueden compararse con los datos que se conocen de la fauna que habitaba lo que actualmente es Europa y Norteamérica durante la misma época. Así, resulta que el nordeste de Tailandia es una de las pocas regiones del mundo donde el registro fósil del desarrollo de la vida de los vertebrados desde fines del Triásico al Cretácico, pasando por el Jurásico (es decir, los tres períodos geológicos que integran la era Mesozoica), se ha conservado en una secuencia razonablemente continua de naturaleza continental y en una área relativamente limitada.

Este registro sirve también de gran ayuda a la geología, ya que contribuye a establecer la edad de los materiales sedimentarios en los que fueron descubiertos los fósiles. Más aún, ilustra la cronología de la deriva y la colisión de los continentes en el sudeste de Asia. La cronología es aquí importante: Tailandia está constituida por fragmentos de dos bloques distintos, o microcontinentes, de historia geológica independiente hasta que quedaron soldados. Según una hipótesis, los bloques formaban parte del borde septentrional de un supercontinente austral llamado Gondwana. (Pudieron pertenecer a la costa septentrional de lo que llegaría a ser Australia.) En algún momento de la era Palezoica, que precedió a la Mesozoica, se separaron de Gondwana y derivaron hacia el norte, como lo hicieron también otros fragmentos parecidos. De manera fortuita establecieron contacto con el supercontinente boreal, Laurasia. Concretamente, colisionaron con el borde meridional de China. El



1. ASI DEBIO SER EL PAISAJE DEL TRIASICO SUPERIOR, del nordeste de Tailandia, hace 220 millones de años; el dibujo constituye una reconstrucción basada en el hallazgo de peces, anfibios y reptiles fósiles por parte de los autores y sus colaboradores en las pizarras y calizas de la formación Huai

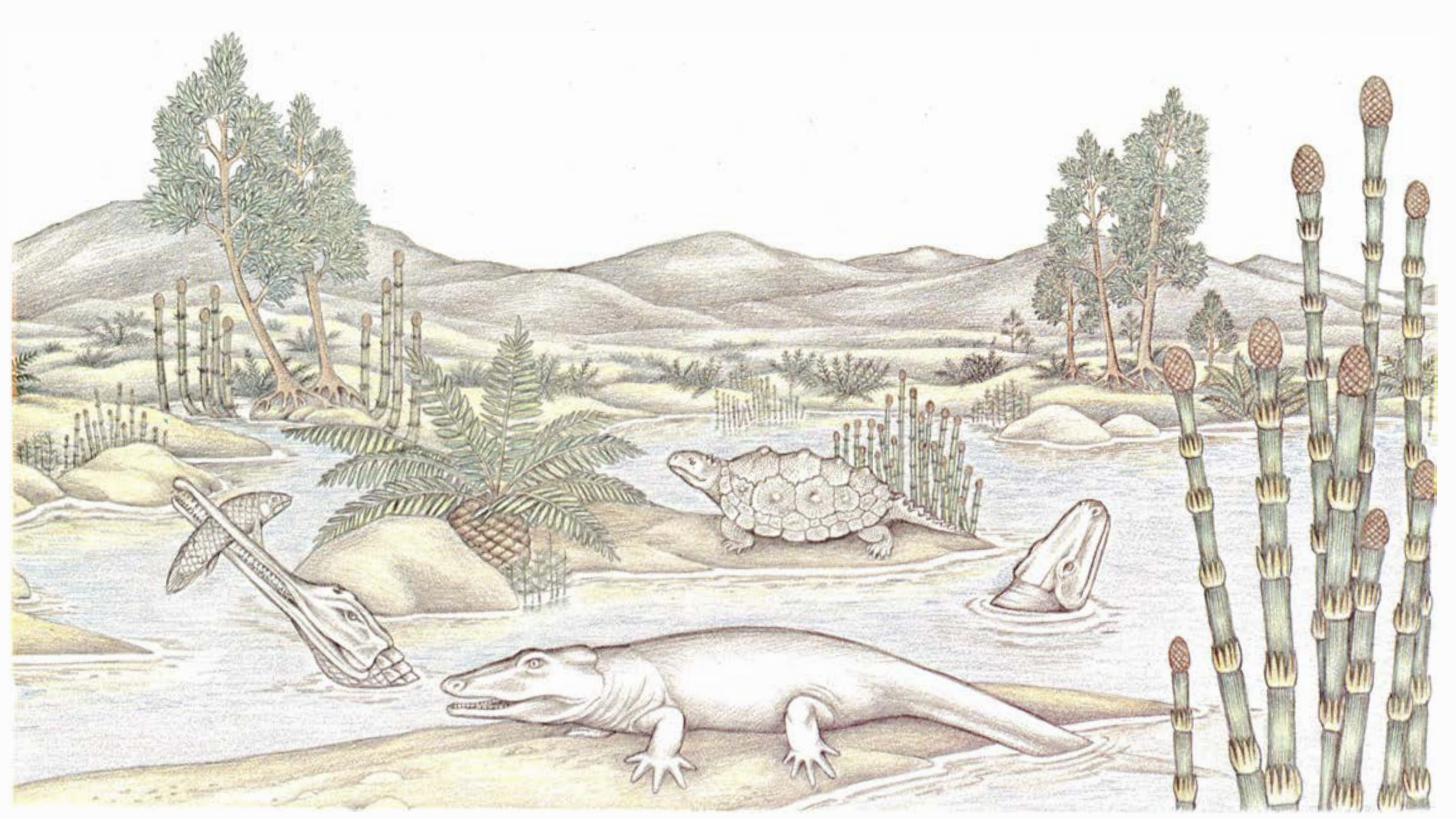
proceso es análogo a lo que debió suceder más de 100 millones de años después, cuando la India, separada asimismo de Gondwana y derivando hacia el norte, chocó con lo que sería después el continente asiático.

Uno de los microcontinentes cuya colisión originó Tailandia se conoce por bloque de Indochina; comprende la meseta de Khorat, del nordeste de Tailandia, así como Camboya y gran parte de Laos y Vietnam. El otro microcontinente se conoce como bloque de Shan-Thai; Sangad Bunopas, del Departamento tailandés de Recursos Minerales de Bangkok, le ha dado ese nombre. La primera parte del mismo alude a los estados Shan de Birmania oriental. El bloque incluye, además, Tailandia occidental y gran parte de la península malaya. Durante los últimos años, varios geólogos han tratado de reconstruir la historia detallada de esos bloques y, en particular, establecer en qué momentos del pasado geológico se soldaron unos con otros y chocaron con la masa continental asiática. Los vertebrados fósiles de Tailandia han proporcionado datos importantes para esa datación.

El registro de la vida mesozoica guardado en las entrañas de Tailandia no hubiera salido a la luz de no ser por el trabajo de nuestros colegas del Departamento tailandés de Recursos Minerales. Su país constituye un ejemplo de las dificultades que se presentan en el sudeste de Asia para la búsqueda de fósiles. Incluso sobre la meseta de Khorat, al nordeste de Tailandia, en la parte más árida de la región, los afloramientos son escasos y están separados unos de otros. Los yacimientos de fósiles que se conocen son más bien de reducida extensión y escasamente espectaculares; algunos corresponden a taludes de caminos o a canteras. Los geólogos de campo del Departamento de Recursos Minerales están acostumbrados al descubrimiento de este tipo de yacimientos. Cuando se produce un hallazgo, nuestro propio equipo procura recoger los restos de manera sistemática. Cuando conviene, se practica una excavación regular. También suele explorarse los afloramientos cercanos, estrategia que a menudo se traduce en nuevos descubrimientos. Tras la preparación y estudio del material, que se efectúa parcialmente en París, los ejemplares se devuelven a Tailandia, para sumarlos a las colecciones del Departamento de Recursos Minerales. En Bangkok, los más interesantes se muestran en el museo de geología.

La mayoría de los fósiles descubiertos en Tailandia proceden de la meseta de Khorat. En esa región, se erosionaron durante parte del Mesozoico grandes cantidades de materiales de las montañas recién levantadas. Los sedimentos se depositaron en las capas fluviales, en las llanuras de inundación y en el fondo de los lagos. Se produjo así una acumulación de areniscas, arcillas y calizas lacustres (calizas depositadas en lagos), conocida entre los geólogos por grupo Khorat. En determinados puntos alcanza espesores de varios miles de metros. Algunas formaciones o conjuntos de capas del grupo Khorat han proporcionado huesos, dientes o huellas de pisadas de vertebrados.

Los fósiles más antiguos proceden de la formación Huai Hin Lat, fundamentalmente constituida por pizarras y calizas bituminosas gris oscuras o negras. Según Chongpan Chonglakmani y Nares Sattayarak, del Departamento de Recursos Minerales, las pizarras y calizas se depositaron en grandes lagos de agua dulce surgidos tras el episodio de levantamiento montañoso que obligó al mar a retirarse de la región a finales del período Triásico, hace unos 225 millones de años. Nuestra expedición de 1980 descubrió una buena localidad fosilífera cerca de la central eléctrica



Hin Lat, del nordeste de Tailandia. Dentro del agua, en el centro, el fitosaurio *Mystriosuchus*, un grueso reptil fuertemente acorazado, agarra entre sus mandíbulas el cuerpo de un pez pulmonado. Otro fitosaurio aparece a la izquierda, junto a la orilla. En primer término, a la derecha, el anfibio *Cyclotosaurus* se desplaza reptando fuera del agua. Se distingue igualmente una tortuga primitiva, *Proganochelys*, en la orilla opuesta, a la derecha.

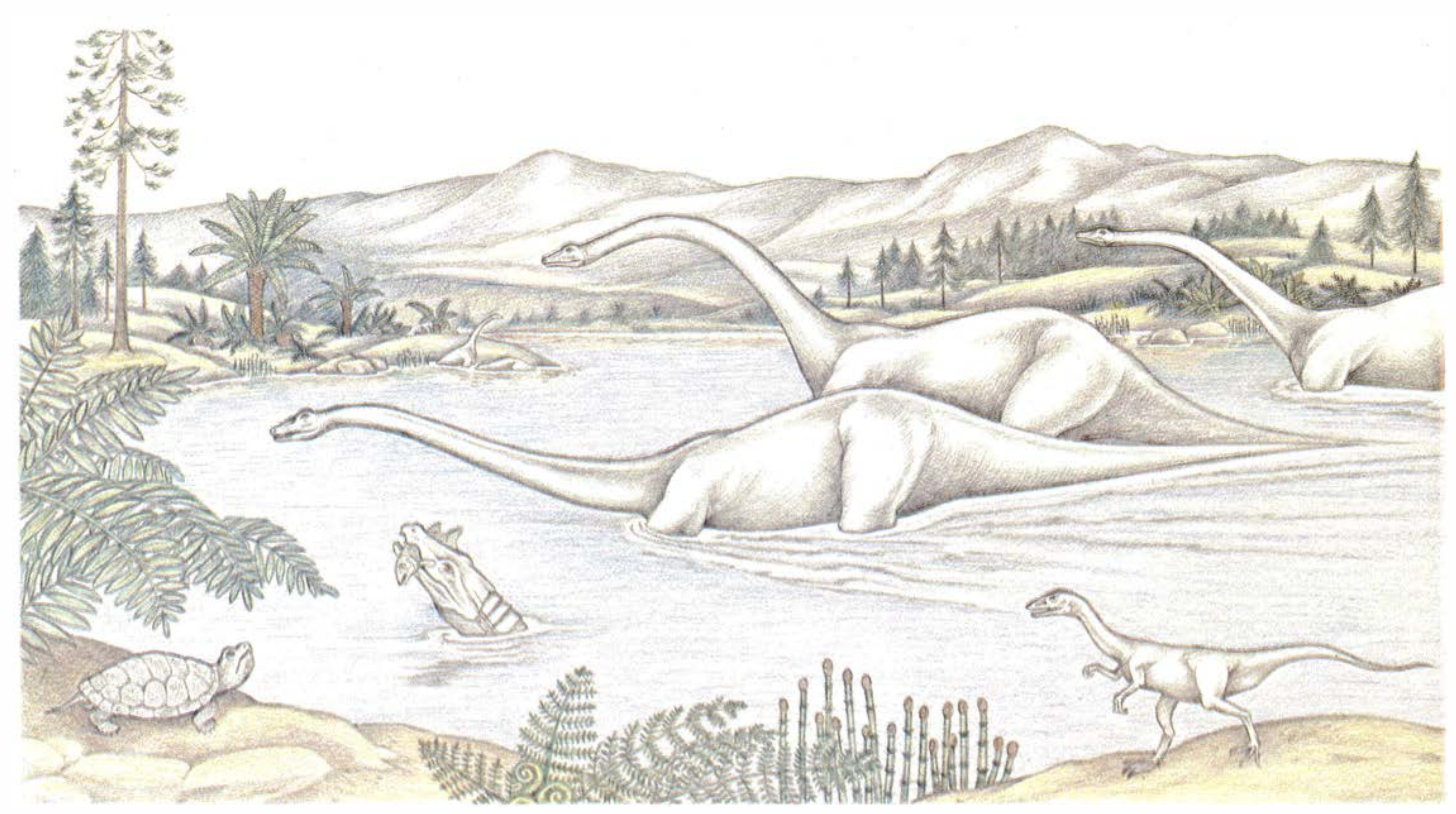
del embalse de Chulabhorn, cerca del borde occidental de la meseta de Khorat. Como cabía esperar, los vertebrados fósiles más importantes corresponden a restos de peces, en particular escamas sueltas de peces óseos arcaicos. También se hallaron placas dentarias pertenecientes a un pez pulmonado (un pez capaz de respirar el oxígeno libre del aire). Las placas dentarias, constituidas por la fusión de dientes, facilitaban al animal la trituración de sus alimentos. Descubrimos también restos de depredadores que se alimentaban de esos peces. En el borde del embalse de Chulabhorn aparecieron fragmentos del anfibio *Cyclotosaurus,* respresentados por la parte posterior del cráneo, bien conservado. *Cyclotosaurus* debía alcanzar una longitud de por lo menos 1,5 metros. Sus delicadas extremidades, largas y anchas, su cabeza aplanada y sus ojos, situados en la parte más alta del cráneo (con lo que podía ver perfectamente aun estando totalmente sumergido), sugieren que permanecía bajo el agua la mayor parte del tiempo.

También se descubrieron junto al embalse de Chulabhorn huesos y dientes de otros depredadores, los fitosaurios. Se trataba de reptiles de gran tamaño, fuertemente acorazados y provistos de dientes cortantes, que prosperaron durante los últimos tiempos del Triásico, aun cuando no parece que sobrevivieran a ese período. Aunque su hocico prolongado, sus breves extremidades y su larga cola les confieren cierta similitud con los cocodrilos, no están directamente emparentados con ellos: los fitosaurios descienden de los tecodontos, el orden de los reptiles triásicos que originaría independientemente, y mucho más tarde, a los cocodrilos y a los dinosaurios. Fitosaurios y cocodrilos constituyen, por tanto, un ejemplo clásico de evolución convergente: la aparición de adaptaciones evolutivas similares, en un mismo medio, por parte de grupos de organismos diferentes. Al contrario que los cocodrilos, que poseen los orificios nasales en el extremo del hocico, los fitosaurios los poseen muy atrás, en la parte superior de la cabeza.

Finalmente, se encontraron también en la formación Huai Hin Lat restos de otro grupo de reptiles, las tortugas. Aunque escasos en el embalse de Chulabhorn, abundan extraordinariamente en otras partes; los fragmentos de sus caparazones llegan a constituir a veces niveles propios en las calizas bituminosas. El caparazón de las tortugas estaba bien desarrollado; sin embargo, en otros aspectos, las tortugas del Triásico eran muy primitivas. Por ejemplo, poseían dientes en el paladar, de lo que carecen las especies más modernas. En general, los restos de tortugas triásicas son poco frecuentes; fuera de Tailandia, los únicos restos bien conocidos corresponden a ejemplares hallados en el sur y centro de Alemania.

Los huesos y dientes fósiles de la formación Huai Hin Lat proporcionan una imagen de las comunidades de vertebrados que habitaban los lagos del nordeste de Tailandia y sus orillas a fines del Triásico. Aportan, además, valiosa información estratigráfica y paleogeográfica. Es decir, contribuyen a situar la formación en la secuencia estratigráfica establecida a partir de las pruebas recogidas en diversas partes del mundo; al tiempo que contribuyen a trazar una imagen de la distribución biogeográfica de fines del Triásico y mostrar, así, la correspondiente disposición de las masas emergidas sobre la superficie de la Tierra.

Puede deducirse la posición relativa de tales masas por el hecho de que los fósiles de Huai Hin Lat recuerdan los de otras partes del mundo. Los fitosaurios constituyen un claro ejemplo. Parece cierto que no existieron más que a fines del Triásico. Por otra parte, su



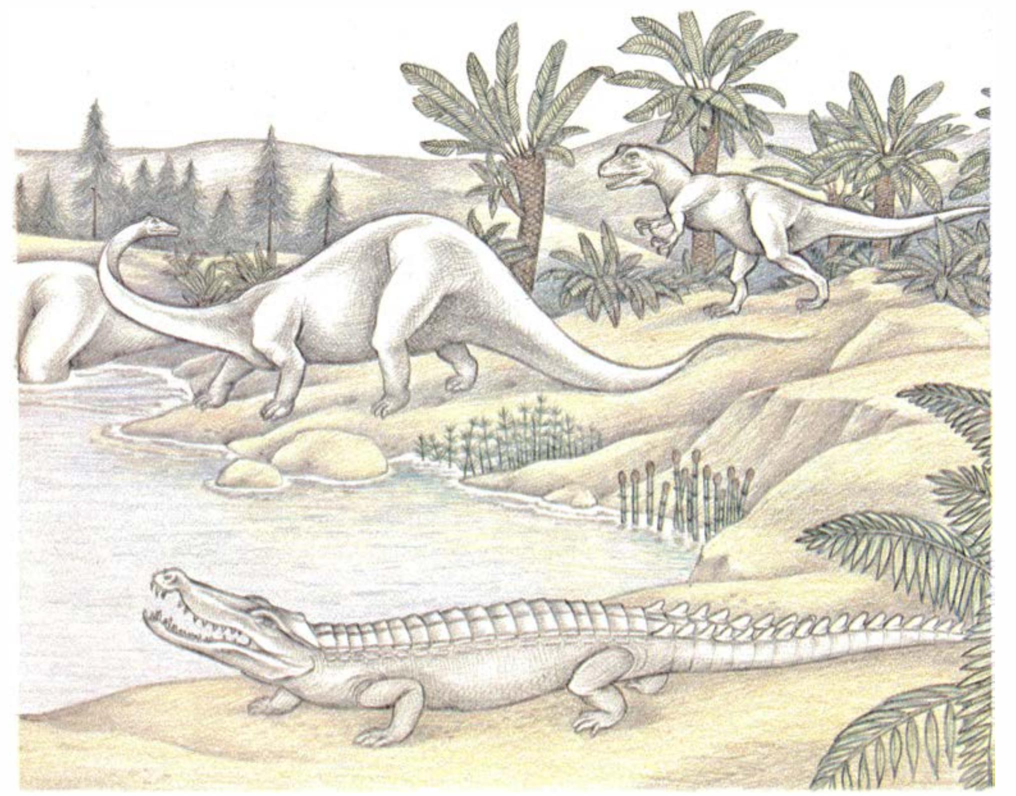
2. PAISAJE DEL JURASICO SUPERIOR, del nordeste de Tailandia, hace 160 millones de años; el dibujo, una llanura aluvial cruzada por amplias corrientes de agua, se ha realizado con el auxilio de los fósiles descubiertos en las limolitas y areniscas de la formación Sao Khua. Las formas de vida dominantes son los dinosaurios. Un grupo de saurópodos (dinosaurios cuadrúpedos y herbívoros) penetra en el agua; el dibujo correspondería al saurópodo *Diplodocus*. El último de ellos huye de un carnosaurio (dinosaurio bípedo y depredador), que podría ser *Allosaurus*, conocido por sus restos descubiertos en

evolución fue rápida. En consecuencia, la presencia, en la formación Huai Hin Lat, de los géneros de fitosaurios *Belodon* y *Mystriosuchus,* muestra que ésta debe ser aproximadamente contemporánea de las formaciones alemanas que contienen los mismos géneros; tales formaciones se sitúan en una época de finales del Triásico conocida como piso Noriense. La asignación queda confirmada por la presencia de los anfibios y tortugas de la formación Huai Hin Lat, que existen también en el triásico superior de Alemania. Siguiendo a Philippe Janvier, del Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Francia (CNRS), el gran anfibio *Cyclotosaurus* de Chulabhorn está estrechamente emparentado con una especie existente en el Noriense de Alemania. En cuanto a las tortugas, France de Broin, también del CNRS, sostiene que están emparentadas con el género *Proganochelys,* anteriormente descrito dentro del Noriense alemán.

Desde el punto de vista paleogeográfico, la fauna de vertebrados de Huai Hin Lat interesa por su semejanza con las faunas de Laurasia. A fines del Triásico, los continentes de la Tierra permanecían todavía unidos; los grandes "supercontinentes", Laurasia en el norte y Gondwana en el sur, estaban enlazados por su extremo occidental. Sin embargo, la vida animal de Laurasia difería ya de la de Gondwana. Los fitosaurios, anfibios y tortugas de Tailandia recuerdan claramente las formas de Laurasia. Lo mismo sucede con los peces: según Michel Martin, de la Universidad de París, las placas dentarias del pez pulmonado de la formación Huai Hin Lat se parecen a las que se han hallado también en China.

En el contexto de la deriva continental, tales semejanzas resultan significativas: indican que en los últimos tiempos del Triásico existía una conexión terrestre entre el microcontinente de Indochina y Laurasia, que permitió a los vertebrados laurasiáticos colonizar Indochina; de no ser así, el bloque indochino habría mostrado una fauna distinta de la que posee, similar a la de Gondwana. Por esta vía, las semejanzas determinan que fueron las postrimerías del Triásico los últimos momentos posibles para la colisión del microcontinente indochino con China. La datación concuerda con la visión actual, que aboga por una colisión triásica, o incluso anterior, en el Paleozoico.

Sobre la formación Huai Hin Lat se encuentra la formación Nam Phong, representada especialmente por areniscas que hasta ahora no han aportado fósiles. A su vez, ésta queda recubierta por la formación Phu Kradung, representada por limolitas y areniscas. En ella se han encontrado también vertebrados fósiles del Mesozoico. Nares Sattayarak logró en 1979 uno de los descubrimientos más espectaculares, en la trinchera de un camino, cerca de la ciudad de Nong Bua Lam Phu, en la zona septentrional de la meseta de Khorat; se trata de la mandíbula inferior de un robusto cocodrilo de agua dulce. Al concluir nuestra campaña de investigación de 1980, el ejemplar estaba casi completo. Posee una longitud de 1,14 metros, lo que sugiere que el animal debía alcanzar cerca de ocho metros. Su hocico era largo y robusto, y poseía dientes fuertes; seguramente se alimentaba de grandes peces. Lo asignamos a *Sunosuchus,* un género ya conocido del Jurásico de la provincia de Gansu, China. El ejemplar chino es menor y difiere en algunos aspectos, de ahí que lo incluyéramos en una especie desconocida hasta entonces, para la que creamos el nombre de *Sunosuchus thailandicus.* No obstante, la presencia de especies estrechamente emparentadas pertenecientes a un mismo género de cocodrilo de agua dulce en China y Tailandia corrobora que ambas áreas constituirían probablemente parte de una misma provincia zoogeográfica durante el período Jurásico.



Norteamérica. En primer término, *Goniopholis,* parecido a los actuales cocodrilos, pero no antepasado de ellos, persigue a *Compsognathus,* uno de los dinosaurios más pequeños de cuantos existieron (de la talla de una gallina), conocido hasta ahora sólo por dos esqueletos, uno recuperado en Baviera y otro en el sur de Francia. En el agua, otro *Goniopholis* aprisiona entre sus mandíbulas al pez *Lepidotes.*

La formación Phu Kradung ha arrojado otros restos de vertebrados en una explotación de conglomerados y areniscas próxima a Ban Wang Dingso, un poblado situado al oeste en la meseta de Khorat. Varios de esos restos los recogió Paladej Srisukh, veterinario de profesión y entusiasta paleontólogo. Además de dientes y huesos que seguramente pertenecen a *Sunosuchus,* los restos hallados comprenden dientes de un tiburón de agua dulce y otros en forma de botón, atribuibles a peces óseos que se alimentaran, quizá, de invertebrados de concha dura. También se encontraron placas de tortuga. Sometidos aún a estudio, estos fósiles proporcionarán sin duda un mejor conocimiento de la fauna mesozoica del nordeste de Tailandia. Además, contribuirán al establecimiento de la edad de la formación Phu Kradung. La presencia de *Sunosuchus* prueba ya que la formación no puede ser triásica. Su precisa colocación dentro del Jurásico permanece incierta.

Difieren entre sí las dos formaciones siguientes. La de Phra Wihan, situada por encima de la formación Phu Kradung, no ha suministrado restos de ver-

tebrados, mientras que la de Sao Khua (encima mismo) es notablemente rica en huesos y dientes. La localidad más generosa de la formación Sao Khua se halla en Phu Wiang, una gran montaña en forma de media luna situada en la parte occidental de la meseta de Khorat. En ese punto, Roon Song Siri, geólogo tailandés que se hallaba prospectando uranio, descubrió en 1976 el primer hueso de dinosaurio exhumado en Tailandia; resultó ser un fragmento de fémur de un gran saurópodo, un dinosaurio de cuello muy alargado. A partir de este primer hallazgo en Phu Wiang, nuestro equipo ha obtenido muchos huesos y dientes pertenecientes a diversos vertebrados. Algunos de los restos no hubo más que recogerlos de una ladera, gracias a la contribución de los agentes atmosféricos que los habían puesto al descubierto entre las areniscas verdosas de grano fino; otros precisaron de una excavación en su matriz arcillosa roja. Seguramente esos abundantes restos de vertebrados se acumularon en una llanura de inundación; los ríos actuarían de medio de transporte, concentrando los huesecillos y dientes. Los fósiles revelan una mezcla de comunidades: los restos de vertebrados fluviales aparecen junto a formas terrestres.

Los fósiles más espectaculares de la formación Sao Khua son los de saurópodo: últimamente se han descubierto grandes huesos de saurópodos en varios afloramientos de la formación Sao Khua; un esqueleto parcial se ha desenterrado en Phu Wiang. (Se está preparando en Bangkok.) Los saurópodos, de largos cuello y cola, posiblemente fueran impresionantes dinosaurios, los grandes reptiles del Jurásico y Cretácico. Entre ellos se cuentan los famosos *Diplodocus* y *Brontosaurus*. En comparación con la media de los saurópodos, los ejemplares tailandeses no son particularmente grandes. Aun así, los hallazgos delatan la presencia de animales que alcanzaban hasta 15 metros de longitud.

Los saurópodos eran herbívoros. Compartían su medio con grandes dinosaurios depredadores: dientes en lámina cortante y borde aserrado, muy comunes en Phu Wiang, revelan la presencia de carnosaurios, los mayores depredadores bípedos que han existido. Los carnosaurios de Phu Wiang debieron parecerse al género *Allosaurus,* del Jurásico superior de Norteamérica, animal imponente de más de 10 metros de longitud, y a formas similares de China, como *Szechuanosaurus.* Finalmente, el grupo de dinosaurios pequeños y esbeltos conocidos por celurosaurios está representado en Phu Wiang por huesos reducidos y huecos, especialmente por un fragmento de tibia. Los huesos dan idea de un animal de frágil estructura, no mayor que una gallina, probablemente muy emparentado con *Compsognathus,* uno de los dinosaurios más pequeños de cuantos vivieron, conocido hasta ahora sólo por dos esqueletos, uno de Baviera y otro del sur de Francia.

Los saurópodos compartían su medio con otros reptiles no dinosaurios. Abundan los restos de tortugas, aunque en estado fragmentario. También hay cocodrilos en la formación Sao Khua: los representa el género *Goniopholis,* un cocodrilo frecuente en los depósitos del Jurásico superior y el Cretácico inferior de Europa y Norteamérica. Por su apariencia externa, *Goniopholis* recordaba a los cocodrilos actuales, si bien no puede considerarse antepasado de éstos. Los peces están representados por las espinas (es decir, refuerzos de las aletas) y los dientes trituradores en forma de placa de tiburones de agua dulce que se nutrían de moluscos, y por los dientes en forma de botón de *Lepidotes,* un género muy difundido durante el Jurásico. En conjunto, los fósiles recogidos en Phu Wiang muestran una comunidad de vertebrados bastante parecida a la que se ha descrito en otras formaciones fosilíferas del Jurásico superior, como la formación Morrison, del oeste de Estados Unidos, o la Shangshaximiao, de la provincia china de Sichuán.

3. LA UNION DE DOS MICROCONTINENTES con el borde meridional de China determinó el origen del sudeste de Asia en el período Triásico (la época inicial de la era Mesozoica), quizás antes, en la era Paleozoica. Los microcontinentes son el bloque Shan-Thai, que constituye la parte occidental del sudeste asiático, y el bloque de Indochina, que corresponde a la oriental. Los vertebrados fósiles descubiertos en Tailandia proceden hasta ahora de localidades (*puntos de color*) pertenecientes en su mayoría al bloque de Indochina, y en particular a la meseta de Khorat, situada al nordeste de Tailandia. No obstante, el año pasado aparecieron vertebrados en una localidad del bloque Shan-Thai, cerca de la ciudad de Trang.

EDAD PROBABLE	FORMACIONES	VERTEBRADOS FOSILES MAS IMPORTANTES
CRETACICO MEDIO (HACE 110 MILLONES DE AÑOS)	FORMACION KHOK KRUAT	ESCUALOS HIBODONTOS; CARNOSAURIOS
CRETACICO INFERIOR (HACE 140 MILLONES DE AÑOS)	FORMACION PHU PHAN	HUELLAS DE DINOSAURIOS
JURASICO SUPERIOR (HACE 160 MILLONES DE AÑOS)	FORMACION SAO KHUA	*Goniopholis* (CROCODILIANO); COMPSOGNATIDOS; ESCUALOS HIBODONTOS; SAUROPODOS; *Lepidotes* (PEZ); TORTUGAS; CARNOSAURIOS
JURASICO MEDIO	FORMACION PHRA WIHAN	
JURASICO INFERIOR (HACE 190 MILLONES DE AÑOS)	FORMACION PHU KRADUNG	PECES; *Sunosuchus* (CROCODILIANO); TORTUGAS
LIMITE TRIASICO-JURASICO	FORMACION NAM PHONG	
TRIASICO SUPERIOR (HACE 220 MILLONES DE AÑOS)	FORMACION HUAI HIN LAT	PEZ PULMONADO; *Proganochelys* (TORTUGA); PECES ACTINOPTERIGIOS; *Cyclotosaurus* (ANFIBIO); FITOSAURIOS

4. FORMACIONES GEOLOGICAS presentes en la superficie de la meseta de Khorat, y que constituyen el llamado grupo Khorat. Cinco de las siete formaciones han proporcionado vertebrados fósiles, que van desde peces, anfibios (*Cyclotosaurus*) y reptiles (tortugas y fitosaurios) del Triásico superior, hasta peces (tiburones y *Lepidotes*), cocodrilos (*Goniopholis*) y reptiles (dinosaurios) del Jurásico superior y del Cretácico. Estas formaciones geológicas cubren el intervalo Triásico-Jurásico-Cretácico: los períodos que constituyen la era Mesozoica. Los dibujos del artículo son obra de Patricia J. Wynne.

Sobre la formación Sao Khua se disponen los bancos de arenisca, bastante potentes, de la formación Phu Phan, que probablemente pertenecen ya al Cretácico inferior. Ha aportado ésta muy pocos fósiles. No obstante, muy recientemente, se han descubierto algunas huellas de pisadas de dinosaurio en ella, junto al Santuario de Vida Salvaje de Phu Luang, una pintoresca montaña alta y aplanada, en el noreste de la meseta de Khorat, cerca de la ciudad de Loei. Las hemos estudiado conjuntamente con Nares Sattayarak y Varavudh Sutteetorn, del Departamento de Recursos Minerales. Se han cartografiado unas 15 pisadas, que ocupan una superficie de areniscas de pocos metros cuadrados de extensión. Aunque algunas presentan bastante desgaste, otras, en cambio, están bien conservadas. Estas últimas muestran tres dedos aguzados, separados entre sí, y con claras impresiones de las uñas. La longitud de cada huella es de unos 35 centrímetros y, su anchura, de 30. Son gruesas, parecidas a pisadas de ave, recordando las que se descubrieron en el Cretácico inferior de la Columbia Británica y de Texas. Llegamos a la conclusión de que pertenecen a un dinosaurio carnívoro bípedo, parecido probablemente a los carnosaurios cuyos dientes se hallaron en la formación Sao Khua.

Del tamaño de las pisadas de Phu Luang y de las distancias entre cada una de ellas cabe estimar (por medio de ecuaciones desarrolladas por R. NcNeill Alexander, de la Universidad de Leeds, y Richard Thulborn, de la de Queensland) la talla de esos dinosaurios y la velocidad a la que se desplazaban. Los cálculos indican que se trataba de animales de una talla de alrededor de 1,8 metros (de la cadera al pie), que avanzaban a unos ocho kilómetros por hora. Tan escasa velocidad (el doble de la de un hombre andando) está de acuerdo con anteriores estimaciones basadas en otras pisadas de carnosaurios —estimaciones que condujeron a Thulborn a la conclusión de que los carnosaurios, así como otros dinosaurios bípedos, preferían un tipo de marcha que suponía un mínimo de consumo energético en la locomoción—. Las pisadas de Phu Luang indican que varios dinosaurios de un mismo tamaño aproximado se desplazaban en la misma dirección, juntos tal vez. (Las pisadas bien conservadas aparecen agrupadas y siempre dispuestas en la misma dirección.) En ocasiones, los carnosaurios dan muestras de cierta conducta de grupo; presumiblemente, reunidos podían cazar grandes presas, saurópodos por ejemplo.

Los restos de los vertebrados tailandeses mesozoicos más modernos conocidos, proceden de la formación Khok Kruat, que recubre la de Phu Phan, y que, según se cree ahora, corresponde al Cretácico medio. De hecho, las areniscas rojas y conglomerados de la formación, procedentes de una explotación próxima a la ciudad de Nekhon Ratchasima, conocida también por Khorat (la meseta de Khorat toma de ella su nombre), han arrojado unos pocos vertebrados fósiles. Los animales terrestres están representados por fragmentos de dinosaurios. Los peces abundan en mayor número. Hace unos años se descubrió el resto casi completo de un pez semejante a *Lepidotes*. Los

dientes de escualos (presumiblemente tiburones de agua dulce) revisten especial interés: su peculiar aspecto muestra una forma desconocida hasta ahora, que quizá se halle también en el Cretácico del Tibet, donde se recolectaron varios dientes durante una reciente expedición geológica franco-china. Los restos tibetanos podrán contribuir al establecimiento más preciso de la edad de la formación Khok Kruat.

Al depósito de las capas de la formación Khok Kruat parece seguirle una invasión marina, relativamente breve, procedente del nordeste de Tailandia, seguida a su vez de un período de evaporación del agua y depósito de sal y potasa, que hoy se explota en el centro de la meseta de Khorat. Hasta ahora no se han extraído vertebrados fósiles de esos depósitos, que podrían pertenecer al Cretácico superior o al Terciario inferior. (El período Terciario marca el comienzo de la era Cenozoica, que sigue a la Mesozoica.) Por el momento, el registro fósil conocido no reaparece hasta con la presencia de los mamíferos de la época Miocena, en el Terciario, encontrados en algunas de las cuencas con carbón del norte de Tailandia.

A pesar de las lagunas e incertidumbres, puede ya entreverse una imagen del desarrollo de las faunas de vertebrados de Tailandia entre el Triásico superior y el Cretácico. Las futuras investigaciones en la meseta de Khorat deberán dirigirse a completar los vacíos que quedan y extender el registro, lo mismo hacia abajo que hacia arriba. Deberán realizarse también campañas para encontrar vertebrados mesozoicos en otros puntos de Tailandia, en parte para que puedan incrementarse las pruebas que apuntalen las relaciones pretéritas entre Indochina y los bloques de Shan-Thai. El descubrimiento de vertebrados del Jurásico, entre ellos el cocodrilo *Sunosuchus* en Ban Wang Dingso, al oeste de la meseta de Khorat, prueba que existen buenas perspectivas en ese sentido. Otro ejemplo lo proporciona el descubrimiento de vertebrados fósiles en la formación Lom Sak, que se halla en un cinturón montañoso plegado, al oeste mismo de la meseta de Khorat. Apoyándose en restos vegetales mal conservados, la formación se había atribuido al Cretácico superior; otros argumentos, de naturaleza geológica, sugerían una edad triásica. Los restos de vertebrados recientemente descubiertos en la formación Lom Sak, estudiados conjuntamente con Michel Martin, muestran la presencia de escamas de peces y dientes de fitosaurios; estos restos indican sin la menor duda una edad que corresponde al Triásico superior.

Un hallazgo efectuado en diciembre de 1984, allende la meseta de Khorat, sugiere que en el sur de Tailandia aguardan enterradas más pruebas. No lejos de la ciudad de Trang, en la península meridional de Tailandia, han aparecido varios vertebrados mesozoicos en una capa de arcilla gris, cuya edad geológica precisa es todavía incierta. Los restos corresponden a placas de tortuga, fragmentos de huesos de cocodrilo y gruesas escamas de un gran pez óseo (posiblemente *Lepidotes*). Los restos son parecidos a los desenterrados por nuestro grupo en la formación Phu Kradung, en Ban Wang Dingso, 1000 kilómetros más al norte; por consiguiente, cabe inferir que la localidad es de edad jurásica y que la fauna de vertebrados del bloque Shan-Thai era análoga, durante esa época, a la del bloque indochino. Tal semejanza está en total acuerdo con la moderna hipótesis sobre la evolución geológica del sudeste de Asia, según la cual la colisión entre los bloques de Shan-Thai e Indochina habría tenido lugar antes del Jurásico, es decir, durante el Triásico, sino antes. El final del Paleozoico y el comienzo del Triásico constituyeron un período decisivo, durante el cual los bloques del sudeste asiático atravesaron una masa de agua conocida por mar de Tethys, llegando quizás a establecer contacto con el sur de China.

En 1984, el geólogo británico Anthony Hallam afirmó que "las cambiantes relaciones de la parte oriental de Gondwana, Tethys y Asia durante los últimos cientos de millones de años posiblemente constituyan el principal reto que deba resolver la investigación geotectónica y paleobiogeográfica los próximos años". Aspiramos nosotros a que la búsqueda de vertebrados fósiles que desarrolla nuestro grupo contribuya a descifrar esa compleja historia.



5. PISADAS DE DINOSAURIO descubiertas en las areniscas de la formación Phu Phan, en el Santuario de Vida Salvaje Phu Luang, cerca de la ciudad de Loei, al nordeste de Tailandia. En total se han encontrado 15 huellas; quizá varios carnosaurios avanzaban juntos, marchando a velocidad moderada.

Restos jóvenes de supernova

Los restos de explosiones estelares recientes ocurridas en nuestra galaxia constituyen intensas fuentes de rayos X. Un telescopio en órbita nos ha revelado su estructura. Uno tiene un púlsar, otros son capas de gas

Frederick D. Seward, Paul Gorenstein y Wallace H. Tucker

En ninguna parte se ve el papel de la suerte en el descubrimiento científico con tanta claridad como en el estudio de las supernovas. Sólo hay constancia de la observación de cinco de estas estrellas en explosión, en nuestra galaxia, a lo largo de los últimos mil años: la última, en 1604, antes de la invención del telescopio. Las primeras mediciones precisas se deben a Tycho Brahe, que estudió la espectacular "nueva estrella" de 1572 durante más de un año; calibró su brillo, por comparación con planetas y estrellas, cada vez más débil hasta que desapareció del campo de visión. Las observaciones de Tycho representan un episodio crucial en la historia de la astronomía; acabarían por romper con la tradición aristotélica, que mantenía la inmutabilidad del reino de las "estrellas fijas". Si la supernova de Tycho se hubiera manifestado una centuria atrás, es decir, antes de que la autoridad intelectual del sistema aristotélico hubiera comenzado a menguar, la astronomía moderna podría haber seguido un rumbo muy diferente. Los archivos medievales chinos registran otras explosiones divisadas en 1006, 1054 y 1181 —la primera de las cuales alcanzó casi el brillo de la luna en cuarto creciente—, pero los astrónomos europeos les prestaron poca atención.

Nuestros conocimientos sobre las supernovas (incluido el de que representan la muerte estelar, y no, como Tycho creyó, su nacimiento) se basan sobre todo en explosiones en galaxias distantes. Sucede, empero, que si bien nadie, desde Johannes Kepler en 1604, ha gozado de la oportunidad de estudiar una supernova próxima, los investigadores de hoy pueden observar los restos de las explosiones contempladas por Kepler, Tycho y otros pioneros de la astronomía. Los restos, catalogados entre los objetos más brillantes de nuestra galaxia, están constituidos por residuos estelares ardientes que han salido arrojados desde el centro de la explosión a una velocidad aproximada de 10.000 kilómetros por segundo. Los restos merecen investigarse por sí mismos, pues nos ayudarán a conocer las propiedades de otros objetos dotados de gran energía y más distantes, como los quasars, por ejemplo. Sirven, también, de banco de pruebas para ponderar los modelos teóricos del mecanismo de las supernovas. Del estudio cuidadoso de un resto, cabe deducir, aunque toscamente, la masa de la estrella que explotó, una variable de importancia crítica en todos los modelos.

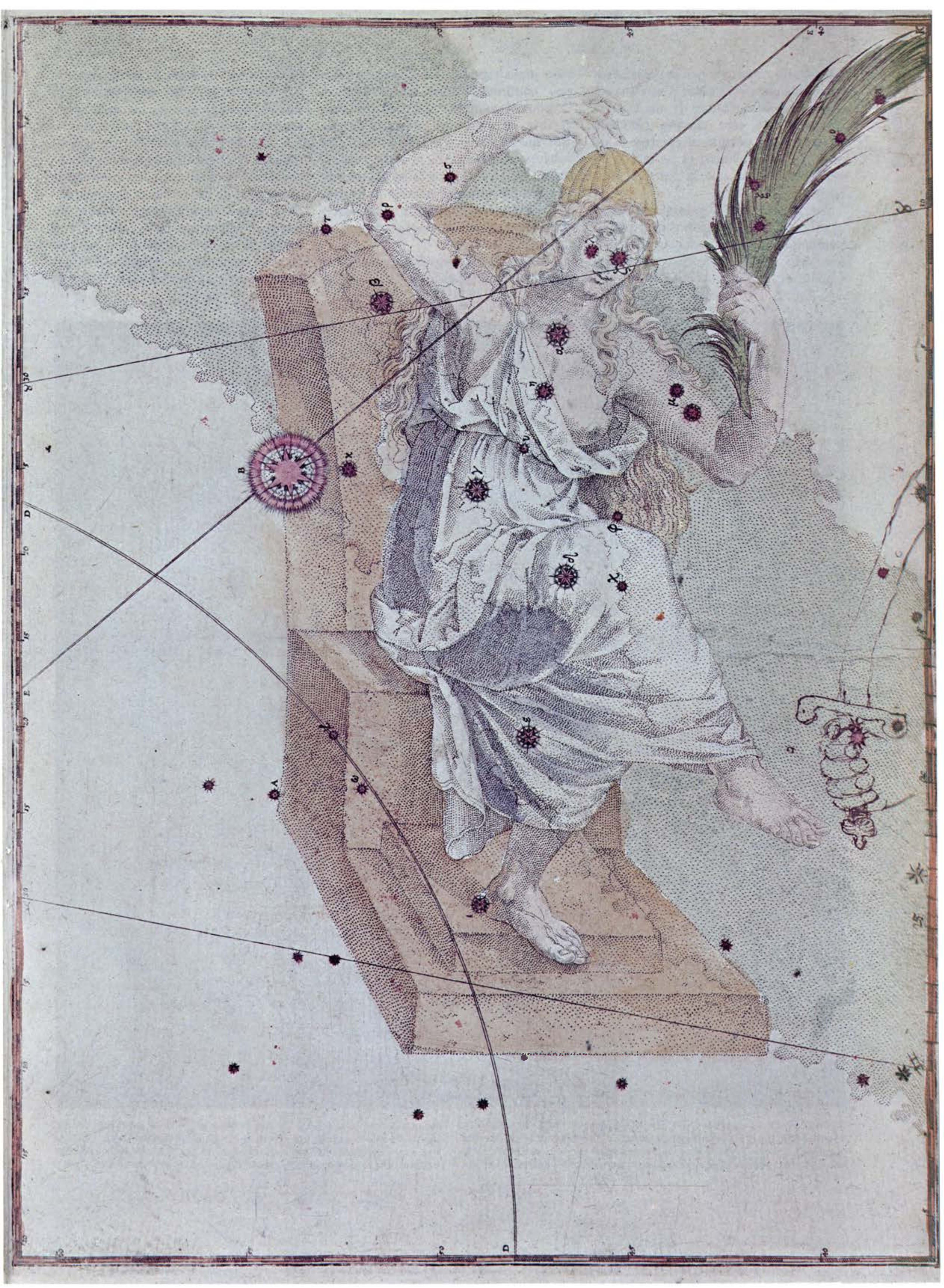
La mejor manera de realizar tales observaciones es usar el dominio de rayos X del espectro. Aunque los restos de supernova se detectan fácilmente con radiotelescopios y algunos se dejan ver también en longitudes de onda ópticas, los más jóvenes se hallan a una temperatura tal que emiten el grueso de su energía en forma de rayos X. El resto de la supernova de Tycho, por ejemplo, emite cientos de veces más energía en la banda de los rayos X que el Sol en todas las longitudes de onda. Ahora bien, visto incluso a través de los mayores telescopios ópticos, resulta un conjunto irrelevante de débiles briznas luminosas. La misma Nebulosa del Cangrejo, impresionante en su visualización y fósil de la supernova de 1054, radia la mayor parte de su energía en la forma de rayos X.

La atmósfera terrestre absorbe los rayos X. La astronomía fundada en ella depende, pues, de instrumentos transportados a bordo de cohetes o satélites. El primer gran telescopio orbital de rayos X fue del Observatorio Einstein, que se mantuvo activo desde noviembre de 1978 hasta abril de 1981 (véase "El Observatorio Einstein de rayos X", por Riccardo Giacconi, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1980). Tanto en resolución angular como en sensibilidad para los objetos débiles, el telescopio Einstein multiplicó por mil las posibilidades de los instrumentos anteriores. Muchos de sus blancos principales fueron restos de supernova. Durante los últimos cinco años, los autores se han dedicado al estudio e interpretación de los datos recogidos de esos objetos.

Mucho antes del advenimiento de la observación de restos de supernova mediante rayos X, la ciencia había llegado al conocimiento general de esas explosiones estelares. Se suele aceptar que una supernova se produce cuando una estrella ha agotado su provisión de combustible nuclear. A lo largo de su evolución, la estrella mantiene su forma gracias al equilibrio entre su presión interna y la tendencia a contraerse bajo su propia gravitación. La presión interna resulta del calor generado por reacciones de fusión nuclear en el centro estelar. En un principio, los núcleos de hidrógeno se funden y forman helio; más tarde, se consume el helio en la constitución de carbono. Con el tiempo, se agota el combustible de la parte central de la estrella, la presión interna desciende y la estrella se contrae.

Pero la mayoría de las estrellas no explotan entonces. Una de tamaño medio (como pudiera ser el de nuestro Sol) se colapsa hasta que su radio es aproximadamente igual al radio de la Tierra. En ese punto, se estabiliza gracias a un efecto mecanocuántico llama-

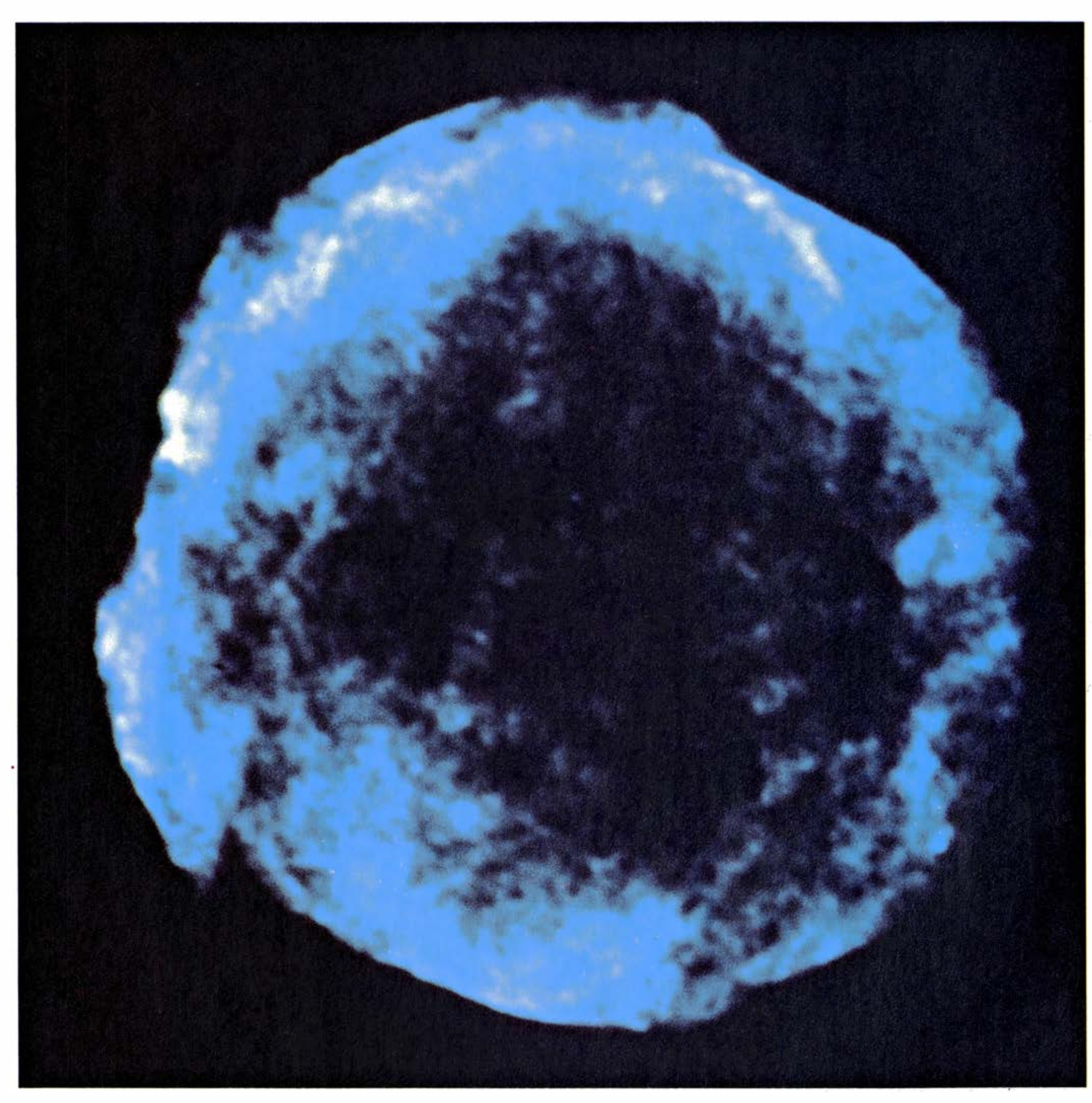
1. "NUEVA ESTRELLA" DE TYCHO. Apareció en noviembre de 1572 en la constelación de Casiopea. En este grabado, realizado por el astrónomo alemán Johann Bayer, publicado en 1603, la supernova es la estrella grande, bajo el brazo derecho de Casiopea. (En la mitología griega, Casiopea era esposa del rey Cefeo y madre de Andrómeda.) Cuando la estrella surgió, tenía una magnitud de -4 y era casi tan brillante como Venus. Desapareció en marzo de 1574. El resto de la supernova se descubrió 378 años después.



do presión de electrones degenerados: los electrones se oponen a una mayor compresión. La materia de una estrella colapsada de este tamaño (llamada enana blanca porque el colapso la ha puesto al rojo blanco) es un millón de veces más densa que la materia ordinaria.

Existe un límite, sin embargo, para el valor de la gravitación sujeta a compensación merced a la degeneración de los electrones. En 1935, Subrahmanyan Chandrasekhar mostró que una estrella cuya masa superase las 1,4 masas solares, continuará colapsando. Con el tiempo, el colapso catastrófico se convertiría en explosión catastrófica. Se cree que la manera de producirse esta conversión depende de la masa de la estrella. De acuerdo con la teoría actual, hay dos mecanismos netamente distintos, que corresponden a la clasificación observacional de las supernovas en dos tipos principales.

Uno de los criterios principales para clasificar una supernova es el de su curva de luz, es decir, la medición de la variación de su brillo con el tiempo. El tipo I de explosiones, las más raras, muestra siempre curvas de luz similares. El brillo de la estrella aumenta rápidamente en las primeras semanas, alcanzando un máximo en el cual puede alcanzar el de mil millones de soles; decrece luego gradualmente durante los seis meses siguientes, más o menos. Las curvas de luz de las supernovas del tipo II, más variadas, se manifiestan unas cinco veces más débiles en su máximo

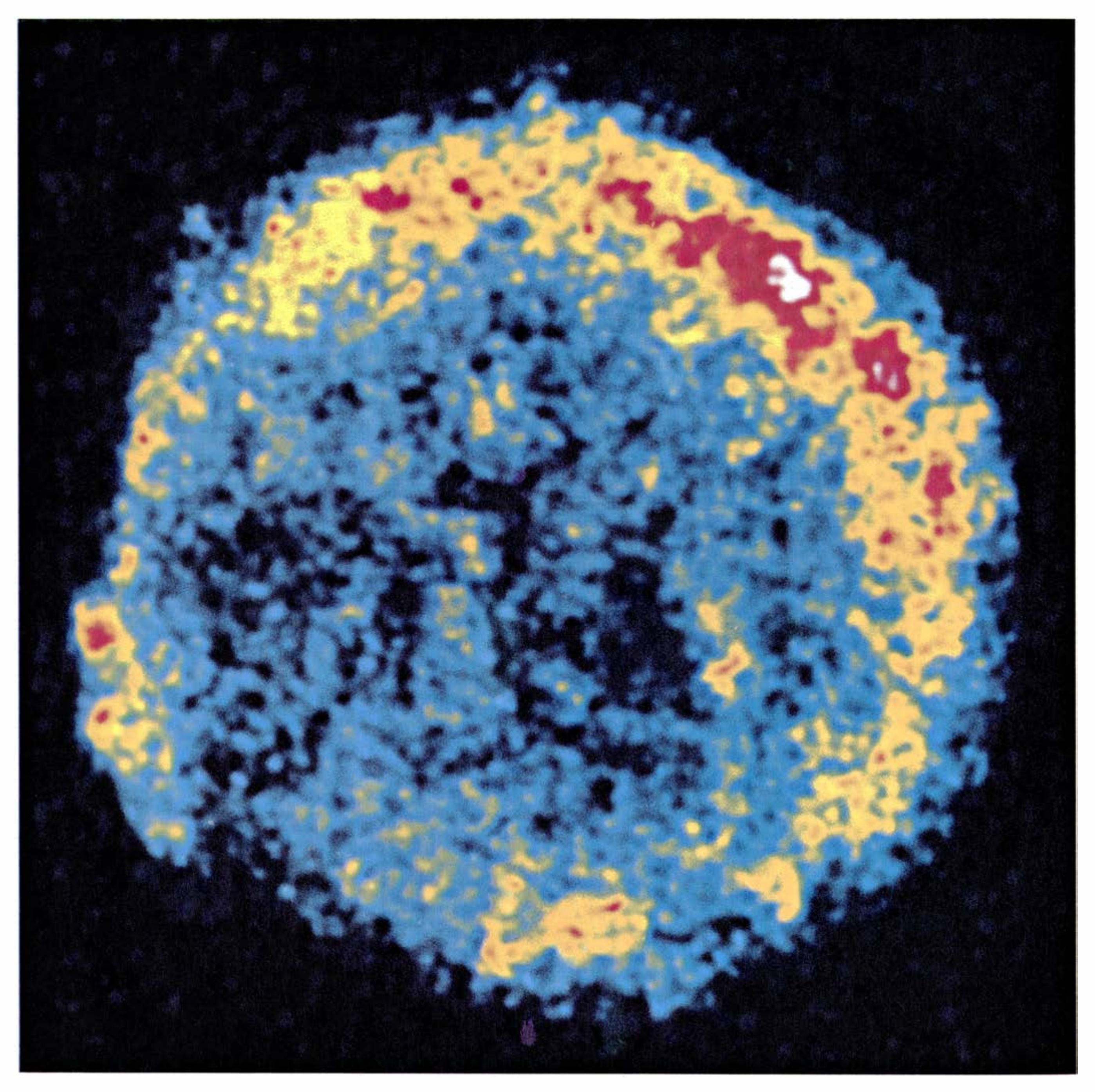


2. IMAGENES DE RADIO Y DE RAYOS X del resto de la supernova de Tycho. Sorprenden por su semejanza. Tanto en longitudes de onda de radio (*izquierda*) como de rayos X (*derecha*), el grueso de las emisiones proviene de una capa cuyo espesor viene a ser el 30 por ciento del radio del resto. La falta de pruebas de la existencia de una brillante estrella de neutrones central apoya el punto de vista de que el resto se formó por la completa destrucción de una enana blanca. En la imagen de rayos X, las porciones de materia estelar caliente de la capa dan cuenta de las emisiones más brillantes (*amarillo*, *rojo* y

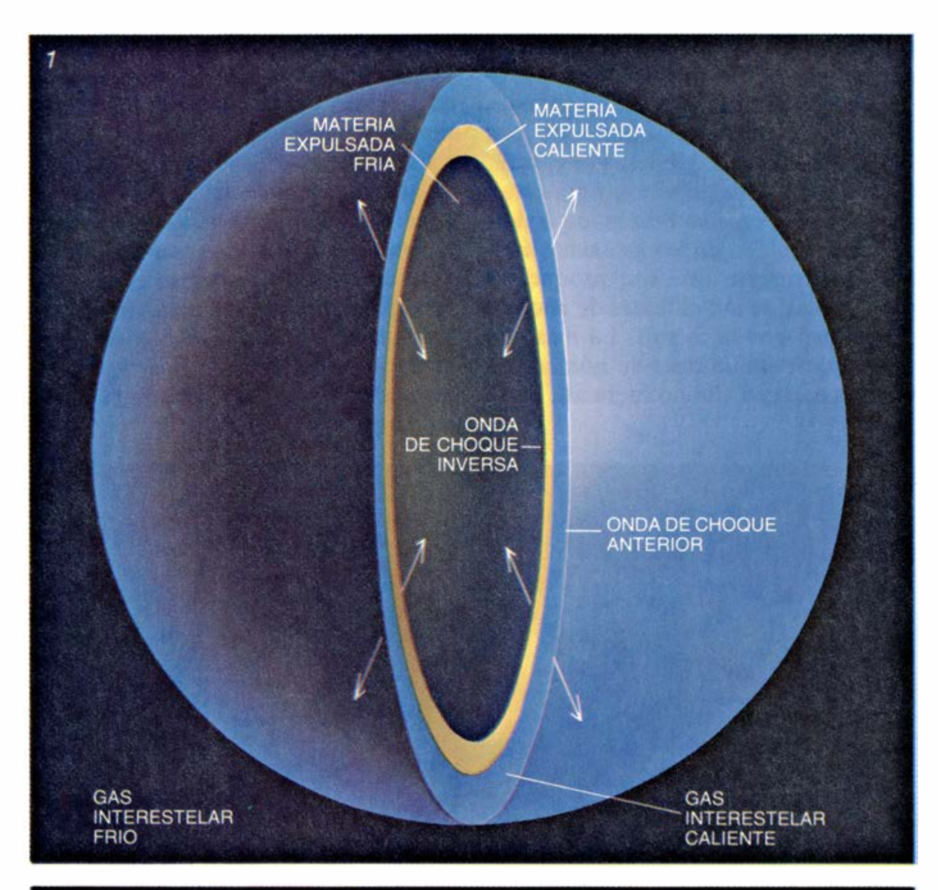
brillo que los sucesos del tipo I y se amortiguan antes.

Las supernovas del tipo II las producen casi con certeza estrellas mayores. Sus espectros sugieren que la explosión tiene lugar en una envoltura de gran masa y rica en hidrógeno que absorbe gran parte de la radiación. Además, la distribución de supernovas del tipo II guarda una estrecha correlación con la distribución de jóvenes y brillantes estrellas de gran masa: las explosiones se producen siempre en los brazos de las galaxias espirales, cerca de las nubes de polvo y gas donde se forman las estrellas; se observan raramente en galaxias elípticas, constituidas sobre todo por estrellas antiguas y débiles. Por contra, las supernovas del tipo I no muestran preferencia por los brazos espirales, dándose también en las galaxias elípticas. Ello sugiere que son producidas por estrellas de mil millones de años de antigüedad por lo menos. La masa de éstas no supera un discreto número de veces la solar; si ello no fuera así, haría mucho tiempo que habrían consumido su combustible nuclear. (Cuanto mayor es la masa de una estrella, con tanta mayor rapidez evoluciona.)

De acuerdo con la hipótesis que goza de mayor aceptación, se produce una supernova de tipo I cuando una estrella enana blanca tiene una estrella compañera cercana. Si ambas se encuentran en órbita binaria próxima, la intensa gravitación de la enana blanca puede arrancar materia de la superficie de su compañera. Con el tiempo, la enana



blanco); los trozos individuales se hallan separados cerca del centro de la imagen. El gas interestelar barrido por la onda de choque forma una zona de débil emisión en la parte exterior de la capa. Esta imagen es azul en la imagen de rayos X y se aprecia con nitidez en el borde superior derecho. El radiomapa fue realizado a una longitud de onda de 20 centímetros por David Green y Steven Gull con el telescopio de cinco kilómetros de la Universidad de Cambridge. La imagen de rayos X fue preparada a partir de datos obtenidos mediante el instrumento de alta resolución del Observatorio Einstein orbital.



blanca, cuya masa es inicialmente inferior a 1,4 veces la masa solar, acumula materia suficiente para llevarla fuera del límite de Chandrasekhar. En este punto comienza de nuevo el colapso.

El espectacular aumento de temperatura y densidad resultante en el núcleo de la estrella conduce a una nueva sucesión de reacciones termonucleares. El carbono y los otros núcleos ligeros producidos durante la vida normal de la estrella se funden para engendrar elementos más pesados, al mismo tiempo que se libera una importante cantidad de energía. Basta ésta para destruir completamente la estrella y expulsar hacia fuera los productos de reacción, a alta velocidad. El níquel radiactivo, desintegrándose en cobalto y hierro, aporta energía adicional a los detritus en expansión, haciéndoles resplandecer; muchos astrónomos creen que esta energía de más explica por qué el brillo de las supernovas de tipo I decrece con relativa lentitud. La semejanza de las curvas de luz del tipo I es atri-





3. ONDAS DE CHOQUE generadas por una explosión de supernova; a ellas se deben las emisiones en radio y rayos X del resto en forma de envoltura. En su dilatación, esta envoltura empuja al medio interestelar, precedida por una onda de choque que calienta el gas interestelar. El choque retarda el avance. Se forma un frente de onda de choque inverso, que se mueve hacia dentro con respecto a la primera onda y calienta el material expulsado. Este, y en menor grado el gas interestelar, emite rayos X térmicos. Los electrones acelerados por la onda de choque emiten radioondas por el proceso de sincrotrón. En una explosión de supernova idealizada (*1*), los frentes de choque son perfectamente lisos y esféricos. En realidad (*2*), la onda de choque del gas interestelar es bastante alisada, pero no lo es la onda de choque inversa, ya que la materia expulsada, irregularmente distribuida, se agrupa en porciones. Vista en proyección (*3*), como se contempla en una imagen de rayos X, la corteza de materia expulsada y agrupada en trozos constituye un anillo incompleto.

buible a la circunstancia de que todas estas supernovas experimentan el mismo proceso de desintegración radiactiva y todas están producidas por las enanas blancas cuya masa está justamente por encima del límite de Chandrasekhar.

Las supernovas de tipo II, por otra parte, resultan según se cree de la muerte de estrellas que tienen por lo menos ocho veces la masa solar. La temperatura interna de las estrellas grandes es mucho mayor que la de las pequeñas, y evolucionan mediante una sucesión de contracciones y reacciones de fusión que forman progresivamente elementos más pesados. Al final de la evolución, el núcleo estelar está constituido principalmente por hierro, cuyos núcleos no se funden de manera espontánea.

Cuando esta masa central inerte rebasa un límite crítico, la parte central —pero no la envoltura gaseosa que la rodea— cae en un colapso brusco. Los electrones y los protones de la parte central se comprimen hasta combinarse y formar neutrones y neutrinos. A medida que prosigue el colapso, los neutrones degenerados ofrecen creciente resistencia, en forma análoga a la presión de los electrones degenerados que estabiliza una enana blanca. Cuando el radio de la parte central se acorta hasta unos 10 kilómetros y la densidad equivale a la del interior de un núcleo atómico, el colapso se detiene de repente. La energía gravitatoria liberada por el colapso es transportada hacia el exterior por los neutrinos y las ondas de choque que destruyen la envoltura gaseosa (véase "Así explota una supernova", por Hans A. Bethe y Gerald Brown, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1985).

Aunque el mecanismo del tipo II difiere del que subyace en una supernova del tipo I, la cantidad de energía cinética que confiere a los productos estelares expulsados viene a ser pareja en ambos casos. Sin embargo, mientras que una explosión del tipo I destruye por entero una enana blanca, una expulsión del tipo II deja tras sí una diminuta ceniza mil millones de veces más densa que una enana blanca: una estrella de neutrones.

La explicación teórica que hemos presentado hasta ahora tiene puntos oscuros. Por ejemplo, se ignora el sino de una estrella cuya masa esté comprendida entre 1,4 y ocho masas solares. (Se conjetura que las estrellas intermedias pierden suficiente masa durante sus vidas, en forma de viento estelar, para poder evolucionar hasta la fase de enanas blancas.) Más fundamental, la explicación de las supernovas de tipos I y II en función de las diferentes masas de sus progenitores estelares no debe considerarse demostrada: nadie ha observado todavía una estrella que explotase luego. Se ha argüido que algunas de las supernovas de tipo I al menos han tenido lugar en regiones donde se están formando estrellas, aludiendo así a un posible producto de estrellas jóvenes de gran masa, mejor que de antiguas enanas blancas. En relación con ello, la observación de los restos de supernova puede prestar cierta ayuda, porque es de suponer que los restos de grandes estrellas difieran de los propios de las estrellas pequeñas. En particular, los primeros deben incluir un denso vestigio estelar.

Tales vestigios no siempre se detectan fácilmente. Si la estrella original tenía una masa muy grande, su núcleo resultará inestable incluso como estrella de neutrones, y colapsará hasta la fase de agujero negro. El campo gravitatorio de un agujero negro alcanza tal intensidad que ni siquiera la radiación se escapa del mismo; el objeto es detectable sólo por su atracción gravitatoria sobre una estrella compañera, si es que tiene alguna. Un resto que contenga un agujero negro no detectado puede atribuirse erróneamente a la destrucción completa de una estrella pequeña. De manera análoga, una estrella de neutrones, que tiene un diámetro de sólo 20 kilómetros, puede escapar a la observación desde distancias de miles de años-luz.

Por fortuna para nosotros, la estrella de neutrones, en particular si es joven, posee extraordinaria energía. Como el campo magnético de una estrella está ligado a la materia estelar, el colapso intensifica enormemente el campo. Se estima que el campo magnético de una estrella de neutrones es aproximadamente 10 billones de veces más intenso que el del Sol. Además, el colapso aumenta la velocidad de rotación de la estrella multiplicándola hasta por 100 millones, porque el momento cinético de ésta se conserva. El campo magnético en rápida rotación induce un campo eléctrico intenso que impulsa a las partículas cargadas hacia el exterior de la superficie de la estrella de neutrones y las acelera hasta altas velocidades. Cuando las partículas describen espirales alrededor de las líneas del campo magnético, emiten fotones. Este efecto, conocido por radiación de sincrotrón, es mayor en la proximidad de los polos magnéticos, que emiten intensos haces de radiación. Por hallarse en rotación la estrella, en la Tierra se observan los haces cual una sucesión regular de impulsos; la estrella de neutrones que los produce se llama púlsar.

La mayor parte de los púlsares emiten sólo radioondas. Para radiar a longitudes de onda más cortas, la estrella debe girar rápidamente y poseer un campo magnético de desacostumbrada intensidad. Sólo se han encontrado tres púlsares que radien en la banda de rayos X. El más luminoso de nuestra galaxia se encuentra en la Nebulosa del Cangrejo, el resto de la supernova 1054.

La imagen de esta nebulosa dada en rayos X por el Observatorio Einstein está dominada por una pequeña región de emisión de sincrotrón —una nebulosa dentro de la Nebulosa— alrededor del púlsar central. El noventa y seis por ciento de la emisión de rayos X proviene de electrones que se mueven a velocidades próximas a la de la luz en la nebulosa de sincrotrón. El otro cuatro por ciento proviene del propio púlsar, que aparece como una brillante fuente puntual. La estrella en rotación emite rápidos destellos (30 veces por segundo), pero un aumento gradual en el período de los destellos indica que la rotación está decelerando. La estrella pierde energía de rotación a la misma velocidad aproximada a la que la nebulosa de sincrotrón radia energía en las bandas de rayos X, óptica y de radio, lo que apoya la idea de que la radiación es producida por electrones de alta energía que salen de la estrella de neutrones.

A diferencia de la Nebulosa del Cangrejo, los restos de las supernovas 1006, 1572 (Tycho) y 1604 (Kepler) no dan pruebas de la existencia de púlsar o estrella de neutrones alguna. Si una estrella de neutrones estuviera presente en un resto, sería de esperar que se recogiese en las imágenes de alta resolución de rayos X. A la distancia del resto de Tycho, por ejemplo, la radiación térmica procedente de una estrella de neutrones de 400 años de edad debería detectarse sin dificultad; de acuerdo con los modelos corrientes del proceso de enfriamiento, tal estrella debería tener una temperatura en superficie de varios millones de grados Celsius. Además, aun cuando un pulsar no sería visible si su haz no apuntase a la Tierra, una estrella de neutrones en rápida rotación debería producir, no obstante, una nebulosa de sincrotrón observable.

Las observaciones del Einstein y exploraciones en la banda de radio han revelado realmente restos parecidos a los del Cangrejo que carecen de púlsar, pero los restos de 1006, 1572 y 1604 no se encuentran entre ellos. Entra dentro de lo imaginable que esos objetos contengan estrellas de neutrones frías en rotación lenta, pero lo consideramos improbable.

Las imágenes de rayos X de los tres restos poseen una apariencia similar a una corteza; los tres se han atribuido a supernovas del tipo I. En el caso de las explosiones de 1572 y 1604, las indicaciones que nos llevan a su clasificación son claras. Las observaciones de Tycho y Kepler fueron tan precisas que, en el decenio de 1940, Walter Baade pudo reconstruir las curvas de luz de las supernovas y mostrar que eran típicas de sucesos del tipo I. Los archivos chinos de la explosión de 1006 no permiten una clasificación concluyente, pero su brillo extremo sugiere que constituyó también una explosión del tipo I. Por otra parte, algunos estudiosos han opinado que la supernova del Cangrejo de 1054 fue un suceso del tipo II, aunque de nuevo las observaciones registradas no son determinantes.

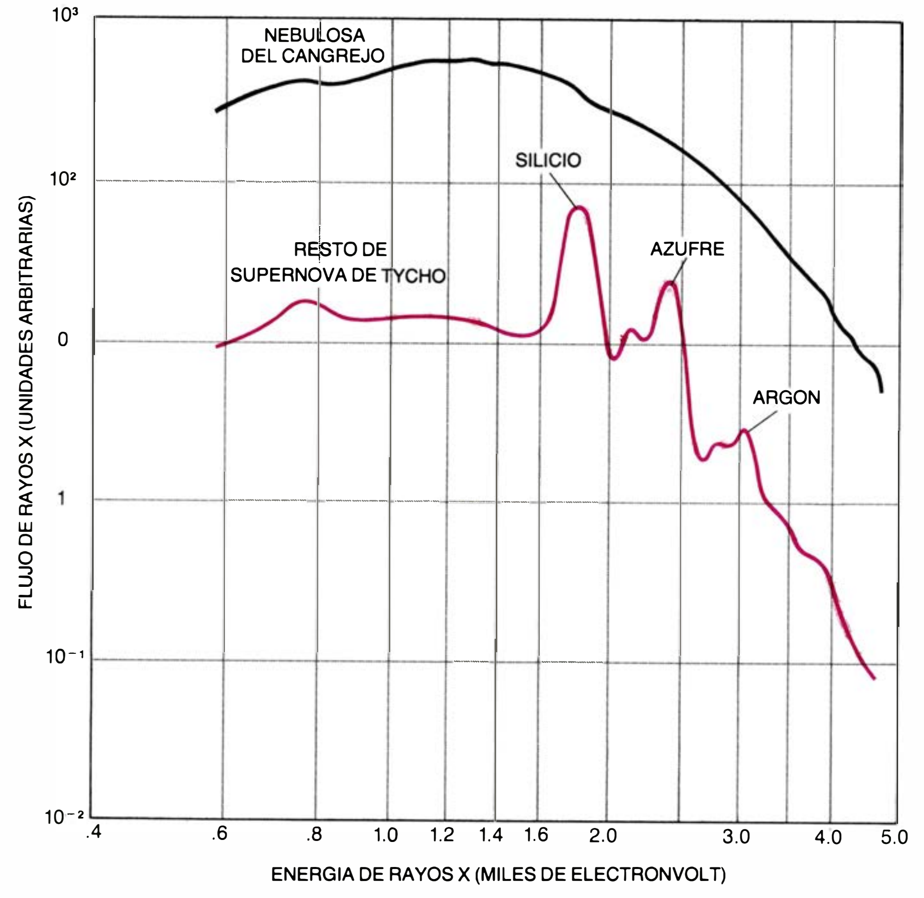
Las observaciones de rayos X apoyan, pues, la idea de que hay dos mecanismos muy distintos que producen supernovas, cada uno asociado a un tipo particular de resto: las explosiones del tipo II, de estrellas de gran masa, dejan restos semejantes al del Cangrejo con estrellas de neutrones; las del tipo I, en las que participan enanas blancas, dejan capas esféricas huecas.

Gracias a su púlsar, la Nebulosa del Cangrejo radia de 70 a 200 veces más energía en la banda de rayos X que los restos 1006, Tycho y Kepler. Los rayos X de los últimos objetos no se generan mediante el mecanismo de sincrotrón. Se trata más bien de rayos X térmicos, resultantes del choque de átomos y partículas cargadas en el estrato en expansión de gas caliente. La Nebulosa del Cangrejo posee probablemente una capa radiante en rayos X que en las imágenes del Einstein queda enmascarada por la emisión de la nebulosa del sincrotrón, mucho más brillante. En los otros restos, la gran capa gaseosa aparece con toda nitidez. Es una nube tenue y transparente, pese a lo cual radia la energía de mil soles.

La capa posee dos componentes. Configuran el primero restos de la estrella que explotó; el otro lo constituye gas interestelar arrastrado por los restos. Inicialmente, los productos estelares expulsados que son más rápidos salen con velocidades de entre 10.000 y 20.000 kilómetros por segundo. El gas interestelar, sin embargo, forma una barrera que ofrece creciente resistencia a la expansión. Cuando el borde anterior de la capa surca la materia interestelar, se forman dos ondas de choque. Una avanza delante de la materia expulsada; la otra, llamada onda de choque inversa, se mueve (con respecto a la primera onda de choque) hacia atrás, encaminándose hacia la materia expulsada. Vistas desde el exterior, ambas ondas se mueven hacia afuera. La materia expulsada tiende a hacerse inestable y romper en porciones a medida que empuja al gas interestelar, que tampoco se halla uniformemente distribuido. Como resultado, los frentes de las ondas de choque no se propagan con la misma velocidad en todas las direcciones y, en consecuencia, no alcanzan una perfecta esfericidad.

La materia más caliente se aloja entre las dos ondas de choque. Aquí, el gas interestelar, antes frío, se ha calentado y comprimido por la materia expulsada en expansión, que, a su vez, se ha decelerado y calentado por la colisión. Tanto la materia expulsada como el gas interestelar entre las ondas de choque radian en el dominio de rayos X.

Los espectros de los restos en forma de estrato esférico revelan el origen térmico de la radiación X que emana de los mismos. La mayor parte de su energía es radiada a frecuencias discretas en forma de líneas de emisión atómica. Las líneas se producen por átomos o iones de un gas caliente que han sido excitados por choques con partículas cargadas. Tales choques hacen saltar uno de los electrones del átomo hasta un nivel de energía más alto; el electrón baja después a un nivel de energía menor emitiendo un fotón. Cada línea de emisión está asociada a una transición particular de energía y, con ello,



4. ESPECTROS DE RAYOS X de la Nebulosa del Cangrejo y del resto de supernova de Tycho. De su análisis se desprende que los dos restos se sirven de mecanismos distintos para producir rayos X. La Nebulosa del Cangrejo contiene un púlsar (una estrella de neutrones en rotación) que emite electrones que se mueven a una velocidad próxima a la lumínica. Conforme los electrones describen hélices alrededor de las líneas del campo magnético en la nebulosa, van emitiendo radiación de sincrotrón en un fondo continuo que abarca la banda entera de rayos X. Por contra, el espectro del resto de Tycho muestra intensas líneas de emisión térmica de los iones silicio, azufre y argón formados durante la explosión de supernova. Los iones se excitan por choques en el gas, cuya temperatura viene a ser de seis millones de grados Celsius. Los espectros fueron preparados por investigadores del Centro de Vuelos Espaciales Goddard.

RESTO	AÑO DE LA SUPERNOVA	TIPO DE SUPERNOVA	DISTANCIA (AÑOS-LUZ)	DIAMETRO ANGULAR DE EMISION DE RAYOS X (MINUTOS DE ARCO; LUNA LLENA = 30)	DIAMETRO INTRINSECO DE EMISION DE RAYOS X (AÑOS-LUZ)	INTENSIDAD RELATIVA DE RAYOS X
RESTO 1006	1006	I?	3,300	30	28	6
NEBULOSA DEL CANGREJO	1054	II?	6,500	1.5 × 1.7	2.8 × 3.2	1,000
RESTO 1181	1181	II?	8,500	4 × 6	10 × 15	0.2
RESTO DE TYCHO	1572	I	10,000	8	22	14
RESTO DE KEPLER	1604	I	16,300 — 32,600	3	14 — 28	5
CASIOPEA A	≈1680	II?	9,100	4	10	40

5. SEIS RESTOS DE SUPERNOVA de nuestra galaxia se hallan asociados a explosiones estelares registradas durante el último milenio. Aunque ningún cálculo de las distancias y tamaños es preciso, los relativos al resto de Kepler son especialmente inseguros. No está clara la fecha de la supernova asociada con Casiopea A porque no hay pruebas de su observación. Las supernovas correspondientes a los años 1006, 1054 y 1181 fueron registradas en China.

revela la presencia de átomos de una substancia particular del gas. La radiación de sincrotrón, por el contrario, se emite a lo largo de un dominio continuo de frecuencias por electrones libres en un campo magnético; no revela, pues, nada acerca de la composición de la nube de gas.

De la intensidad de sus líneas de emisión, se evidencia que los niveles del silicio, azufre, argón y calcio son apreciablemente más altos en los restos de estrato esférico que en el Sol o en el gas interestelar. El resto de Tycho está enriquecido, una seis veces, en esos elementos de "peso medio". El enriquecimiento sólo puede atribuirse a la supernova. Así, los espectros de rayos X proporcionan una prueba convincente de una teoría frecuentemente invocada pero rara vez comprobada: los elementos más pesados que el helio se producen en el interior de las estrellas y las explosiones de supernova los reparten por el espacio. (Como las capas esféricas se expanden a lo largo de cientos de miles de años, los elementos pesados se dispersan por el medio interestelar.) En el examen de los espectros, sin embargo, llama la atención una ausencia particular, la de indicación de la existencia de elementos más pesados que el calcio; en particular, del níquel, cobalto y hierro, que se suponen producidos en las explosiones del tipo I. Quizás esos elementos del grupo del hierro están presentes a temperaturas demasiado bajas para poder radiar en la banda de los rayos X.

En principio, las observaciones de rayos X permiten calcular la masa y la composición de un resto térmicamente radiante. Hay una fórmula bastante sencilla que relaciona la luminosidad de una nube de gas con su temperatura, volumen y densidad. La temperatura se puede deducir del espectro del gas; cabe inferir así la densidad de un resto a partir de su luminosidad observada. Si gracias a los datos de rayos X distinguimos entre el material estelar expulsado y el gas interestelar recogido por la capa en su movimiento, podremos calcular por separado la masa de cada uno de ellos. Como la masa de la materia expulsada debe ser aproximadamente igual a la masa de la estrella que explotó, el cálculo indicará si la estrella fue una enana blanca, como predice la teoría para las supernovas del tipo I.

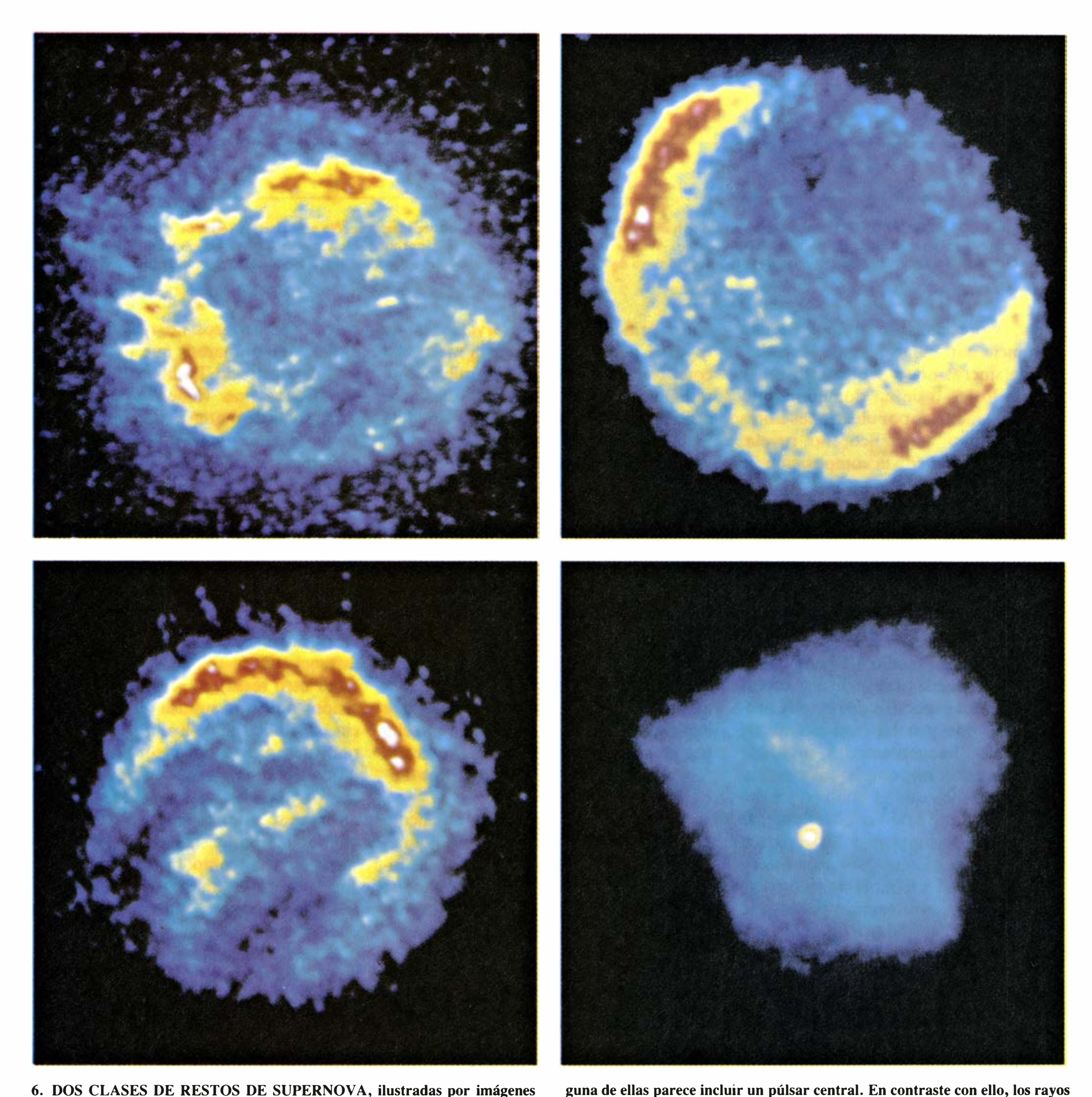
Los autores han realizado el cálculo para el resto de Tycho. En la imagen de rayos X, se distinguen el gas interestelar sometido a la onda de choque y la materia expulsada [*véase la segunda ilustración de la figura 2*]. El gas interestelar aparece débilmente visible en el borde de la imagen, allende mismo del anillo principal donde las emisiones presentan máxima luminosidad. El anillo está probablemente formado por trozos de materia expulsada superpuestos a lo largo de la visual; los pedazos se resuelven con nitidez en el centro de la imagen. Calculamos el tamaño medio y la masa de los trozos centrales. Suponiendo que el promedio se aplica también a los pedazos no resueltos en el anillo, determinamos que la capa esférica del resto de Tycho contiene unos 400 trozos que vienen a sumar una masa solar de materia. La emisión difusa de la capa denota la presencia de otra masa solar de residuos dispersos, lo que hace la masa total de la materia expulsada aproximadamente doble de la masa del Sol.

Se trata de un valor un poco alto para una enana blanca, que no debería superar las 1,4 masas solares. La discrepancia puede atribuirse a la incertidumbre en nuestros cálculos. En particular, la distancia del resto de Tycho (o de cualquier otro resto) no se conoce con precisión; nosotros supusimos una distancia de 10.000 años-luz. Si la distancia real fuese un 15 por ciento inferior, la luminosidad intrínseca en rayos X sería menor y la masa estimada de su progenitor descendería hasta aproximadamente 1,5 masas solares. Nuestros resultados son compatibles, por tanto, con la teoría de que el resto de Tycho se produjo por la destrucción completa de una enana blanca. Aunque no podemos descartar absolutamente la posibilidad de que dentro de la capa caliente se oculte materia expulsada o incluso una estrella de neutrones, creemos que el peso de las pruebas favorece la idea de una explosión de masa pequeña.

Fundados en el brillo del gas interestelar comprimido por la onda de choque hemos estimado también la masa de la materia arrastrada. Viene a ser de unas dos masas solares. El resto de

Tycho parece hallarse en un estado intermedio de evolución en el que el material barrido empieza a dejarse sentir en la capa. Dentro de pocos siglos más, la materia interestelar dominará la dinámica de la dilatación de la capa y dará cuenta de la mayor parte de su radiación. A medida que la materia se vaya mezclando íntimamente con la procedente de la explosión, se perderá la mayor parte de la información relativa a la explosión de supernova: la velocidad de expansión inicial y la masa y contenido de la estrella en elementos pesados. La mezcla del material expulsado y el gas interestelar hacen ya difícil estimar la masa de la supernova 1006. El resto del suceso 1006, a juzgar por su espectro de rayos X, está menos enriquecido en elementos pesados de lo que está el resto de Tycho: su materia estelar se ha diluido más.

El resto de la supernova de Kepler de 1604 plantea otro problema: queda, quizás, a doble distancia que el resto de Tycho; en la imagen del Einstein, el gas interestelar comprimido por la onda de choque no se distingue fácilmente de la materia expulsada. Podría calcularse todavía la masa de la estrella, pero no hemos intentado hacerlo. No obstante, como afirmamos arriba, la ausencia de indicaciones de estrellas de neutrones



6. DOS CLASES DE RESTOS DE SUPERNOVA, ilustradas por imágenes de rayos X del Observatorio Einstein. Como el resto de Tycho Brahe, el de Casiopea A (*parte superior izquierda*), SNR 1006 (*parte superior derecha*) y el resto de Kepler (*parte inferior izquierda*) semejan una envoltura: sus rayos X son emisiones térmicas de una corteza en expansión formada por materia estelar expulsada en la explosión y gas interestelar barrido por aquélla. Ninguna de ellas parece incluir un púlsar central. En contraste con ello, los rayos X de la Nebulosa del Cangrejo (*parte inferior derecha*) son radiación de sincrotrón procedente de una pequeña región alrededor de un brillante púlsar central. El resplandor de la nebulosidad de sincrotrón puede enmascarar una envoltura circundante; la Nebulosa del Cangrejo brilla 170 veces más que SNR 1006, aun cuando se le asigne aproximadamente la misma edad.

en los restos de 1006 y de Kepler apoya la hipótesis de que fueron producidos por la explosión de enanas blancas.

La ausencia de una estrella de neutrones en otro resto semejante a una capa esférica, que no hemos mencionado hasta ahora, resulta más inquietante. Llamado Casiopea A, constituye el resto benjamín: la velocidad de expansión de la capa implica que la supernova se produjo en los últimos decenios del siglo XVII. No hay indicación concluyente de que la explosión fuese observada en la Tierra (aunque William B. Ashworth, Jr., de la Universidad de Missouri, ha aducido que John Flamsteed, el primer Astrónomo Regio de Inglaterra, observó una "nueva estrella" en aproximadamente la posición correcta en 1680). Que no despertara mayor interés induce a sospechar que no sería muy brillante, lo que abona la hipótesis de que constituyó un suceso del tipo II. De acuerdo con la teoría, el resto debería tener una densa estrella en su centro, pero la imagen de rayos X no revela la nebulosa de sincrotrón que debería esperarse alrededor de una estrella de neutrones. A falta de pruebas observacionales, sólo cabía especular que Casiopea A contuviera un agujero negro.

Además de ser un objeto luminoso en rayos X, Casiopea A constituye la fuente más brillante de radioemisión del cielo; los otros restos en forma de corteza se pueden cartografiar también en detalle a las longitudes de onda de la radio. (Casiopea A, el resto de Tycho y otros muchos restos más antiguos fueron descubiertos como radiofuentes.) En tanto que los rayos X de esos objetos son térmicos, no ocurre así con las radioemisiones. Son radiación de sincrotrón producida por múltiples electrones de alta energía que se mueven en un campo magnético. Los electrones no pueden alcanzar la energía de los que hay en la Nebulosa del Cangrejo; de lo contrario, también ellos emitirían rayos X. Pero sí adquieren velocidades próximas a la de la luz. Puesto que los restos en forma de cáscara no parecen contener estrellas de neutrones, ¿de dónde proceden las partículas de alta energía?

La pregunta reviste particular interés, porque un fenómeno semejante parece estar actuando a escala mucho mayor en las radiogalaxias activas y en los quasars. En el caso de las supernovas, la explosión inicial no basta para explicar la presencia de electrones de alta energía en el resto, porque las partículas habrían escapado de ésta, a lo largo de los siglos, o bien habrían radiado la mayor parte de su energía. Las ondas de choque de la explosión deben continuar acelerando los electrones hasta altas energías.

Si las radioemisiones se atribuyen a las ondas de choque, sería de esperar la semejanza entre las imágenes de radio y rayos X de un resto en forma de corteza, porque la mayoría de los rayos X provienen de materia calentada por la onda de choque. La verdad es que la correspondencia entre las dos imágenes es notable en todos los restos jóvenes que hemos examinado. Las observaciones de radio y rayos X combinadas pueden en el futuro ayudar a descifrar el mecanismo de aceleración por la onda de choque. De acuerdo con una prometedora hipótesis, las porciones ionizadas de gas de la materia expulsada comprimida por la onda de choque forman remolinos magnéticos turbulentos; los electrones del resto son acelerados por choques con esas porciones y emiten radioondas a medida que describen espirales en torno a las líneas del campo magnético.

El descubrimiento del resto de Tycho mediante el radiotelescopio de Jodrell Bank en 1952, unos 378 años después de que la estrella desapareciera, representó un hito en el campo de la astronomía. Era adecuado que el valor de la nueva tecnología se pusiera de manifiesto en un objeto asociado con el nombre de Tycho, pues fue el primero de una pléyade de astrónomos que dedicaron no poca energía —y el extrovertido Tycho la poseía en buena medida— a la mejora de los instrumentos astronómicos. En los decenios transcurridos desde el descubrimiento de Jodrell Bank, las imágenes en rayos X de los restos han añadido una dimensión más al estudio de las supernovas.

Pese a ello, nada de lo que hemos aprendido de la observación de los restos podría compararse con lo que los astrónomos conocerían de las supernovas si tuvieran la suerte de presenciar otra brillante explosión en nuestra galaxia. Como las estrellas próximas están ahora bien catalogadas, sería posible, por ejemplo, decir si la estrella que había estallado era una enana blanca u otro objeto de mayor masa. Cuando se produzca la próxima supernova galáctica, los astrónomos estarán preparados, gracias a la tradición iniciada por Tycho, con un arsenal de potentes instrumentos. Sus observaciones abrirán insospechadas vías de investigación.

El hielo antártico

Con un espesor medio de 2200 metros, empieza a reconstruirse su historia climática gracias a los análisis de sondeos profundos. Se ha cartografiado ya el substrato rocoso del continente

Uwe Radok

La expresión "terra incognita" (territorio desconocido) que aparece a menudo en los mapas antiguos podría aplicarse hoy al casquete de hielo que cubre la Antártida y descarga cada año más de un billón (10^{12}) de toneladas de hielo en el mar que circunda al continente. No se sabía gran cosa de los hielos polares hasta los descubrimentos logrados durante el Año Geofísico Internacional (AGI, O IGY), hace 20 años. Resultante de otro esfuerzo internacional de investigación —el Proyecto Internacional de Glaciología Antártica (PIGA, frecuentemente citado en sus siglas inglesas IAGP)— se ha creado un fondo de información acerca del núcleo de la región, el casquete de hielo del Antártico oriental. Los descubrimientos, valiosos en sí mismos por los datos que proporcionan de esta área tan poco conocida, ayudan también a determinar la contaminación global y el incremento del dióxido de carbono en la atmósfera procedente de la quema de combustibles fósiles. Me ocuparé aquí de algunos descubrimientos de este proyecto, al que he estado asociado desde sus comienzos, en 1969.

El estudio del casquete de hielo antártico comenzó con la expedición de Bellingshausen, enviada por la Rusia imperial en 1820, que confirmó la existencia de una cubierta de hielo en el continente sur. Las expediciones posteriores fueron estableciendo paulatinamente la extensión lateral del casquete de hielo, pero su altura media permaneció ignota hasta 1956, a comienzos del AGI. Sólo se había obtenido el cálculo de la elevación media en 1911, gracias al geógrafo alemán Wilhelm Meinardus, quien analizó los cambios estacionales de la presión barométrica y razonó agudamente que debíanse al movimiento de idas y venidas sobre el borde del casquete polar. Sus cálculos dieron un valor medio de la elevación del hielo en torno a los 2100 metros.

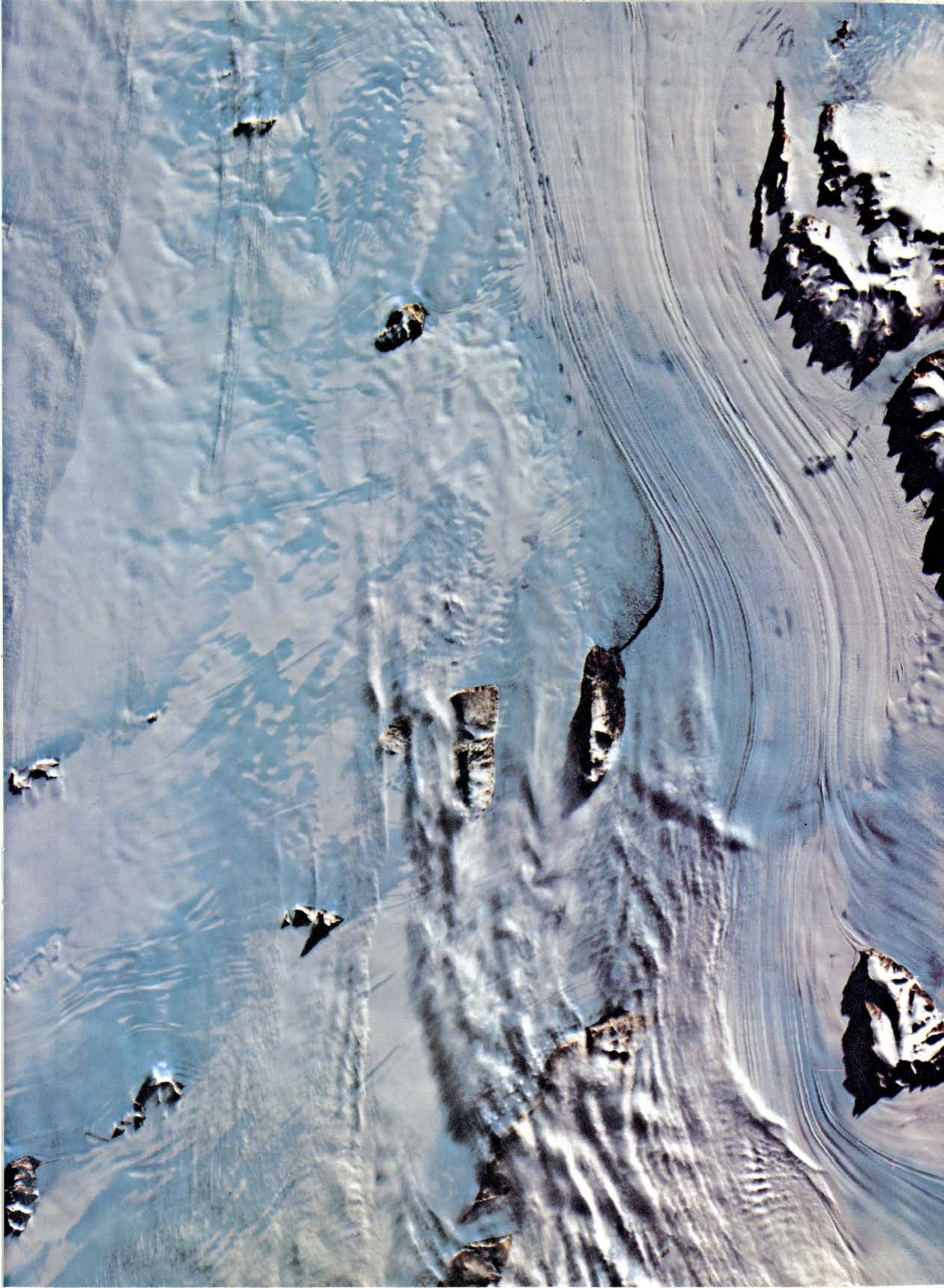
La primera ocasión para comprobar esa altura llegó cuando en los mapas objetivos de la Antártida se incorporaron los datos de múltiples travesías de superficie realizadas durante el AGI. También en estos mapas había siempre una extensa zona central que permanecía ayuna de información, si bien emergía la forma general del casquete polar, cuyas principales características eran la gran masa de hielo de la Antártida oriental y el lóbulo, de dimensiones mucho menores, de la Antártida occidental (del tamaño de Groenlandia). El centro de la capa de hielo no cae en el mismo polo geográfico, sino que se halla a 83° S, 53° E. Por estar igualmente alejado de todas las costas circundantes, ese punto se denomina Polo de Inaccesibilidad Relativa. La mayor elevación del hielo registrada en los mapas del AGI es de casi 2200 metros sobre el nivel del mar, bastante próxima a la estimación calculada por Meinardus.

Desde el AGI se han producido importantes progresos gracias a los avances tecnológicos: observaciones por satélite, sensores remotos y simulaciones por ordenador. El impulso dado por el PIGA ha sido también decisivo. Este proyecto agrupa cinco misiones principales (australiana, francesa, nipona, estadounidense y soviética) a las que hay que añadir la del Reino Unido en una investigación coordinada del casquete helado de la Antártida oriental. Está gobernado por una junta de coordinación de los investigadores participantes que se reúnen una vez al año para cotejar resultados y ponderar ulteriores operaciones, por separado o en cooperación. Los resultados de las reuniones anuales aparecen en el *Antartic Journal of the United States* como una contribución especial al PIGA, preparado por Guy Guthridge y Richard M. Cameron, de la división de programas polares de la estadounidense National Science Foundation.

El casquete polar plantea tres frentes amplios de investigación. Constituye el primero su topografía (superficie y suelo), necesaria para determinar la descripción detallada de la altimetría de la superficie y el espesor del hielo. El segundo frente habrá de aclarar el llamado régimen de hielo: su temperatura a distintas profundidades y el balance entre lo que se gana en nieve y lo que se pierde en icebergs y agua fundida. El tercer frente tendrá que determinar las propiedades estructurales y químicas del hielo. Por último, toda esta información se introducirá en los modelos del casquete polar que describan su historia y predigan su futuro.

Durante el AGI las alturas de la superficie del hielo se determinaron a través de la presión barométrica a lo largo de las rutas recorridas. Los cambios de presión con relación a la altitud se infirieron de la medición de la temperatura en la atmósfera sobre el casquete. Entonces y por algunos años más, el espesor del hielo se calculó por métodos sísmicos y gravimétricos. El método sísmico exigía interpretar las ondas sísmicas reflejadas desde la base del hielo en respuesta a las explosiones provocadas en la superficie. El método gravimétrico implicaba medir los valores de la gravedad en numerosos lugares, fundándose en el hecho de que la fuerza de la gravedad en cualquier punto depende en parte de las proporciones de hielo

1. GLACIAR LAMBERT, un accidente característico del casquete helado del Antártico oriental. Es el mayor del mundo. El glaciar fluye hacia la plataforma de Amery, que cae en la parte superior de la fotografía. La imagen de satélite cubre un área de casi 24.300 kilómetros cuadrados (135 por 180 kilómetros). Esta imagen computerizada fue preparada por el Servicio Geológico de Procesamiento de Imagen con sede en Flagstaff, Arizona, a partir de los datos obtenidos por un satélite del tipo Landsat.

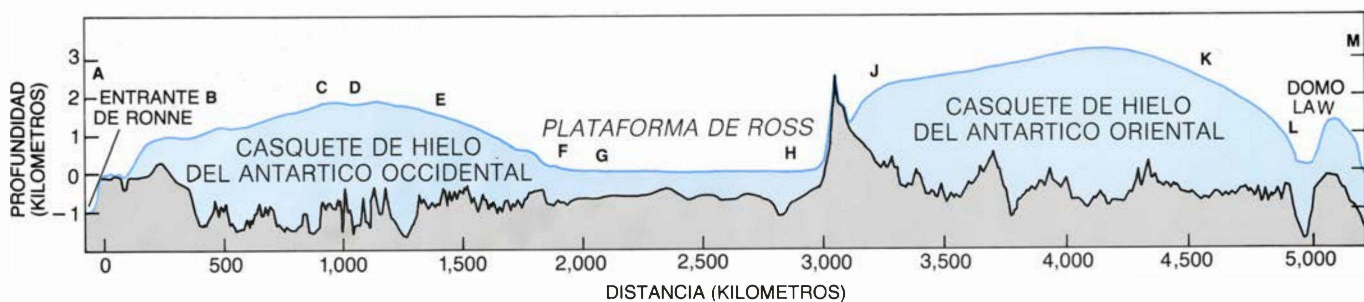


y roca subyacentes a ese punto. (También depende de la altitud y de la latitud del punto.) El espesor medio determinado por estos métodos venía a cifrarse en los 2000 metros. La estimación más reciente lo sitúa en los 2160 metros.

Andando el tiempo, se descubrió que el radar ofrecía una vía mejor para medir elevación y espesor. Su utilidad se puso de manifiesto tras las dificultades que los aviones dotados de altímetros radáricos encontraban al sobrevolar la Antártida; en otro ámbito, esa conveniencia la confirmaron las observaciones de la ionosfera realizadas durante el AGI.

Los pilotos que sobrevolaban la Antártida habían advertido que sus altímetros radáricos registraban de vez en cuando lecturas excesivamente altas al paso por el casquete polar. La situación llegó a provocar accidentes y pérdidas de vida en condiciones de "altura absoluta", cuando no se distingue la superficie. El fenómeno ionosférico, que en un comienzo no parecía tener nada que ver, era que las señales de radar enviadas desde el hielo no lograban a veces producir el eco correspondiente aunque las condiciones para la reflexión fuesen buenas.

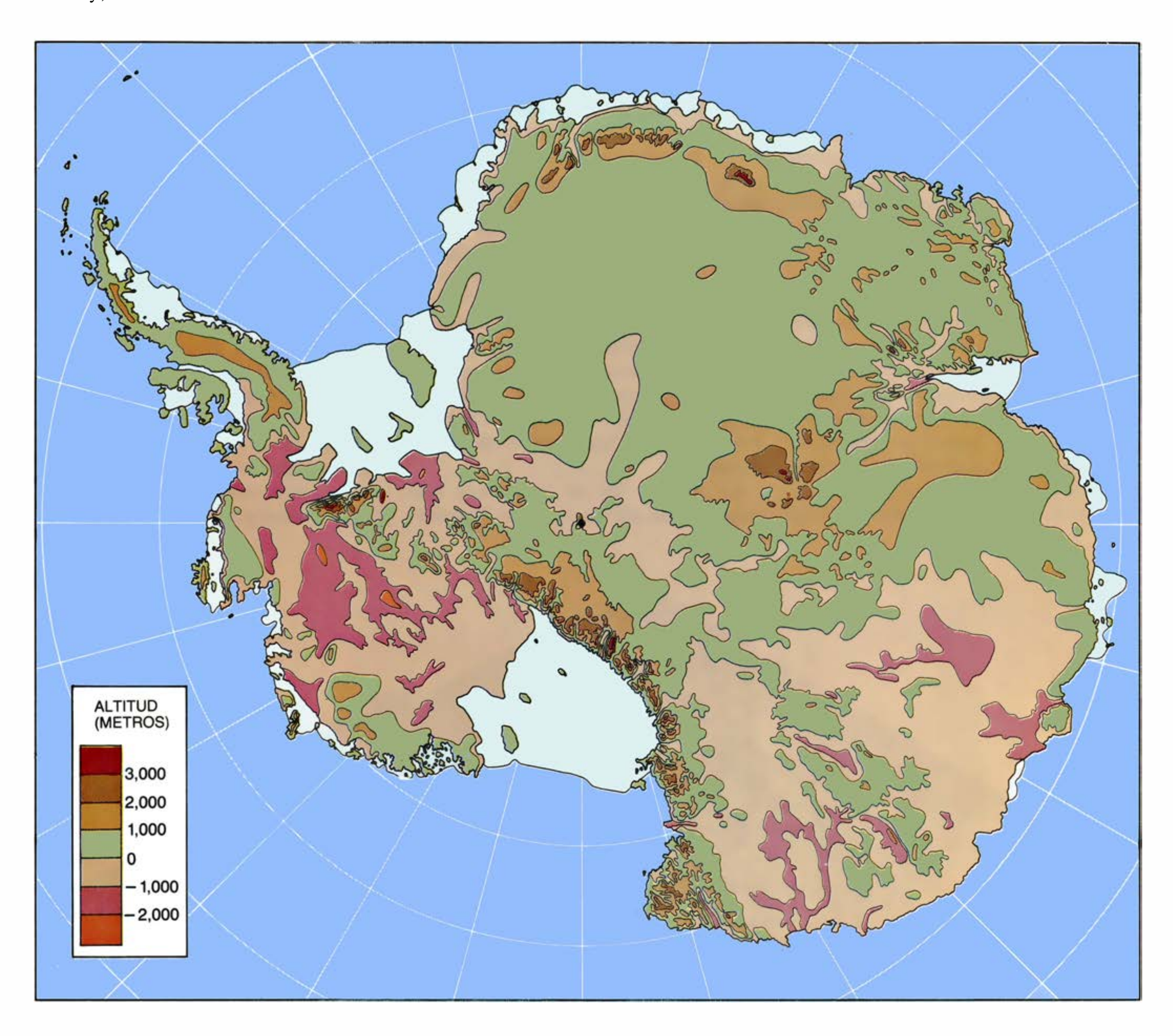
La explicación de ambos fenómenos es la siguiente: algunas señales de radar penetraban en el hielo y se reflejaban hacia arriba desde la base, los altímetros radáricos sumaban el espesor del hielo a la verdadera altitud y los ecos ionosféricos quedaban anulados por in-



terferencia con los ecos procedentes del techo rocoso subyacente.

El primer experimento de la medición del espesor del hielo por radar acometido con éxito fue realizado en 1957 por Amory H. Waite, del Cuerpo de Transmisiones del Ejército norteamericano. El desarrollo de lo que se ha convertido en ciencia de la radioglaciología débese a Stanley Evans, Gordon de Q. Robin y David J. Drewry, de la Universidad de Cambridge. En calidad de integrantes del PIGA, el grupo británico y las misiones norteamericana, rusa y australiana han empleado el radar aerotransportado para cartografiar la altimetría de superficie y el substrato rocoso de una extensa parte de la Antártida. Se han levantado mapas complementarios de la superficie topográfica con los datos de radar obtenidos por satélites y por los globos que circundan la tierra a una altura constante.

Los barridos radáricos han confirmado la existencia de grandes cadenas de montañas bajo el hielo. También han descubierto barrancos y planicies. Se supone que estas últimas constituirían lagos subglaciares, que el calor procedente del interior de la tierra mantiene descongelados. Datos topográficos esos que revisten un interés capital a la hora de escoger los puntos apropiados para la perforación dentro del hielo a fin de extraer testigos que revelen la historia del hielo a lo largo de cientos de miles de años.



2. HIELO Y TIERRA de la Antártida cartografiados a partir de los datos obtenidos durante el Año Geofísico Internacional (AGI, que comenzó en 1956) y, desde 1969, con el Proyecto Internacional de Glaciología Antártica (PIGA), que congrega las principales misiones de Australia, Francia, Japón, Estados Unidos y Unión Soviética más un grupo del Reino Unido. El mapa de la página anterior muestra la superficie de hielo. El Polo de Inaccesibilidad Relativa (a 83° S, 53 ° E) se halla en el centro del casquete helado; así se denomina por estar igualmente alejado de todas las costas circundantes. Bajo el mapa se esquematiza un perfil del hielo y del lecho rocoso, realizado a lo largo de una línea irregular que queda identificada en el mapa por las letras que van de la *A* a la *M*. El mapa de esta misma página nos presenta el lecho rocoso del continente antártico. Los datos relativos a dicho substrato se obtuvieron mediante sondeos de radar a través del hielo, tomados desde la superficie helada y desde aeroplanos. La técnica ha recibido el nombre de radioglaciología.

El creciente refinamiento y potencia de los sistemas de radar para investigación en hielos ha revelado que la mayor parte del casquete helado no es uniforme, sino que está constituido por capas internas. Estas reflejan suficiente energía de radar para poder registrarse junto a los ecos procedentes de la superficie y de la base. Tales ecos internos podrían partir de múltiples irregularidades del hielo. Verbigracia: cambios en la densidad y en la estructura cristalina (resultantes quizá de la fusión o de la deformación), concentraciones de impurezas y capas de mayor acidez debida a la actividad de antiguos volcanes.

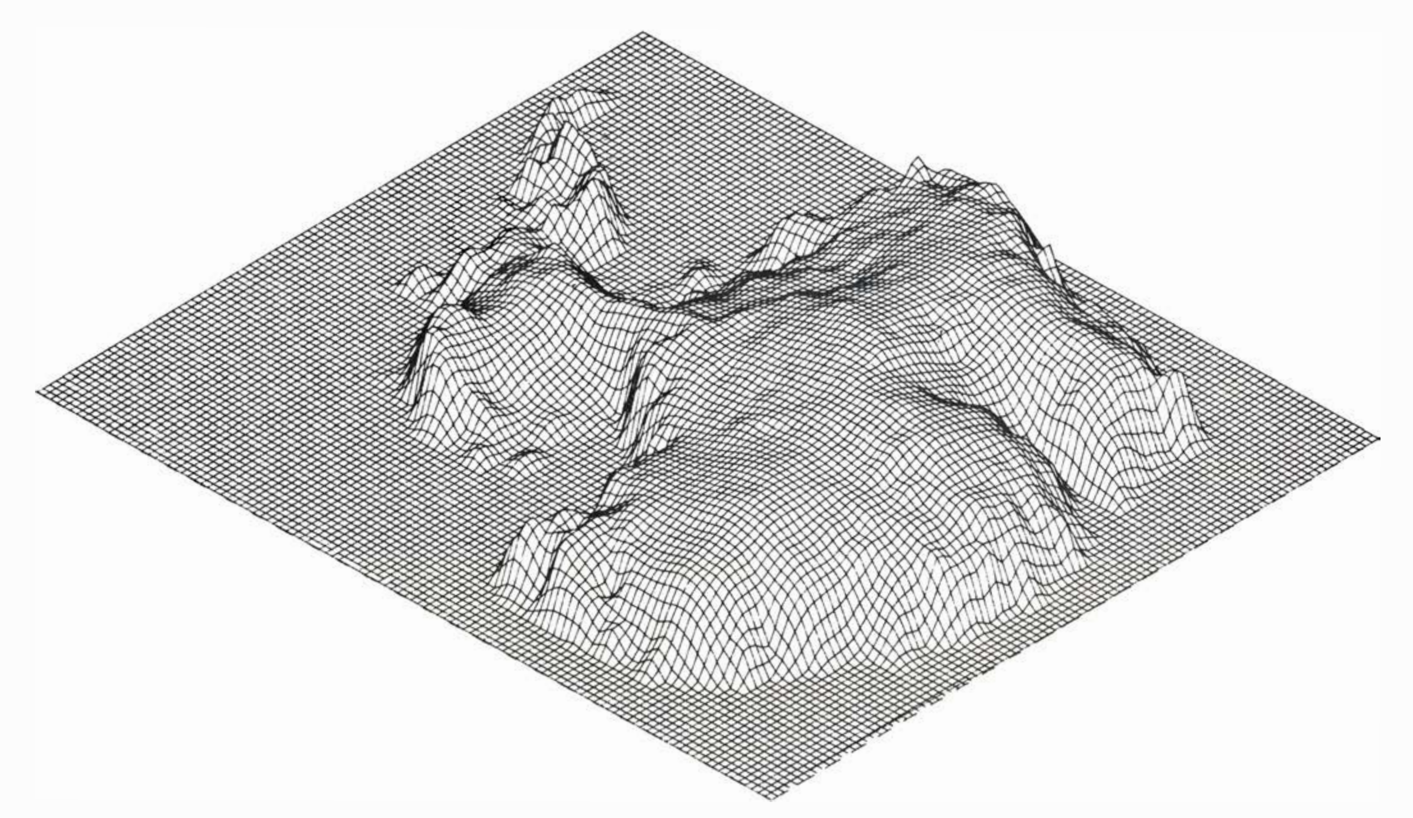
Los ecos internos informan sobre la historia del hielo, lo que explica que sean objeto de intensa investigación donde convergen el estudio de testigos del hielo y las formas en que las ondas electromagnéticas se comportan y se modifican en su recorrido a través del hielo. Recientemente, Charles R. Bentley, de la junta de coordinación del PIGA y de la Universidad de Wisconsin en Madison, llevó a cabo, con sus colegas y alumnos, un programa extenso de mediciones del PIGA en una perforación de 900 metros y en sus alrededores; perforación que habían acometido los investigadores franceses en un promontorio helado conocido por Domo *C*. Las mediciones establecieron valores fiables para la velocidad de propagación de las señales de radar en el casquete helado y permitieron examinar, por primera vez, la resistividad eléctrica del hielo en cuanto indicador de las características estructurales y químicas del casquete. De particular interés fue el hallazgo de que el hielo más profundo, depositado durante la última edad glaciar, ofrecía una resistividad eléctrica más alta que el resto del hielo, por razones que todavía no se han desentrañado.

La pendiente de la superficie, junto con el espesor del hielo, determina la dirección y magnitud de la fuerza gravitacional que provoca el flujo del hielo hacia el exterior desde sus puntos más altos. Hasta hace poco, era difícil medir el movimiento salvo en relación a un punto de referencia estable, un afloramiento rocoso, por ejemplo. Vitali Bogorodskii, de la Unión Soviética, y John F. Nye, de la Universidad de Bristol, desarrollaron, cada uno por su cuenta, una técnica para deducir el movimiento sin el apoyo de un punto de referencia estable. Se basa en los cambios sutiles que se producen en los ecos de radar generados incluso por ligeros desplazamientos del hielo sobre las irregularidades inalterables del lecho rocoso.

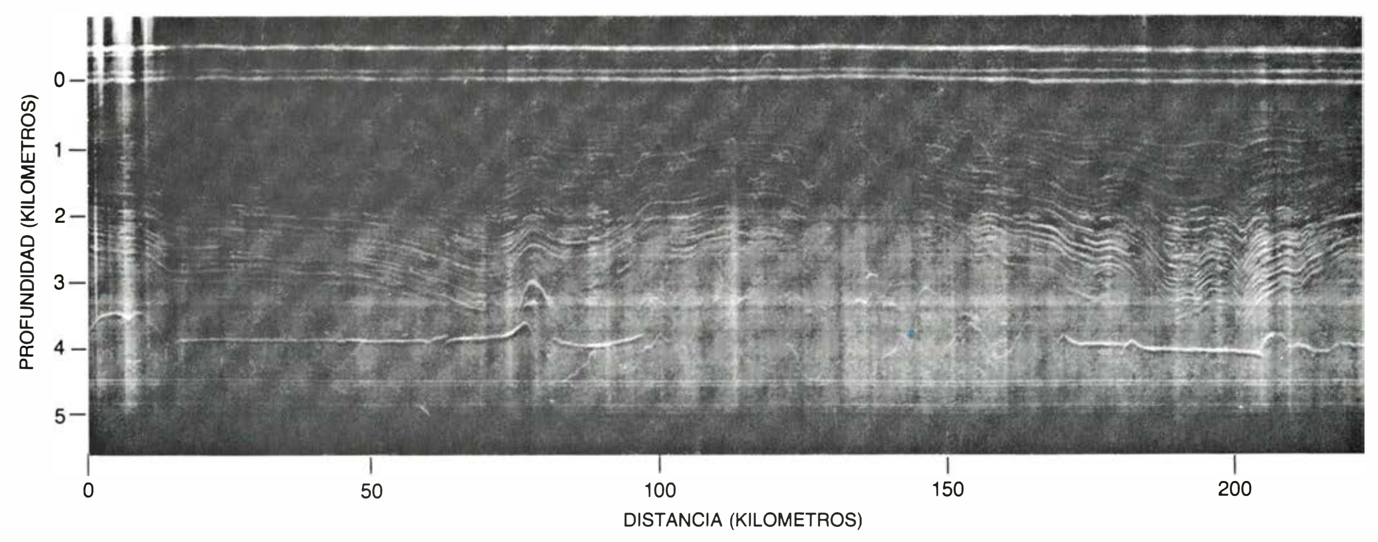
Se dispone hoy de un método más potente fundado en el efecto Doppler: la variación que en la frecuencia de un sonido o una señal electromagnética produce el movimiento del objeto generador o reflector. Las mediciones de este efecto en señales procedentes de satélites que pasan sobre un punto del casquete helado dan la posición de dicho punto con una precisión de hasta metros. Mediciones repetidas de un punto dado revelan su desplazamiento debido al movimiento del casquete, aun cuando éste sea de sólo uno o dos metros por año.

Bastante menos ha avanzado, desde el AGI, el trabajo sobre el régimen del casquete helado —la temperatura del hielo y el balance de ganancia y pérdida de masa—. Más aún, todas las observaciones de interés relevantes proceden de las travesías durante aquel año o inmediatas. El problema radica en la carencia de nuevas técnicas de medición, desde aviones o satélites, de la temperatura reinante a escasos metros bajo el hielo y del ritmo con que el casquete crece o disminuye.

H. Jay Zwally, de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, ha propuesto un método para medir a distancia la tasa de acumulación de nieve. Se basa en la radiación electromagnética de longitud de onda centimétrica emitida espontáneamente por el casquete helado. La emisión de-



3. TOPOGRAFIA DEL CASQUETE ANTARTICO, según aparece en esta imagen generada por ordenador, basada en mediciones realizadas durante el AGI y el PIGA. La orientación coloca a la península Antártica en la parte superior izquierda. El espesor promedio que alcanza el hielo es de 2200 metros.



4. SERIACION EN CAPAS INTERNAS del hielo antártico, puesta de relieve en este registro de radar, leído desde un aeroplano. La imagen revela un lago subglaciar, probablemente descongelado por el calor procedente del interior de la tierra. El lago produce el eco de radar plano que aparece entre 20 y 70 kilómetros en la escala de distancias y vuelve a surgir (porque el aeroplano cruza su propia ruta) entre 170 y 200 kilómetros. El registro muestra que los ecos de radar tienden a desvanecerse cerca de la base del hielo. Este trayecto radárico se ha realizado en las proximidades de la estación de Vostok.

pende de la temperatura del hielo y de la cantidad de radiación que dispersan los cristales de hielo de los 20 o 30 metros superiores del casquete, antes de llegar a la superficie. En consecuencia nos debería informar sobre los cambios sufridos en la estructura de la nieve que están relacionados con la tasa de acumulación de nieve fresca. Con esta técnica, todavía en desarrollo, los sensores de microondas ya instalados en los satélites aumentarían grandemente el caudal de información existente sobre el equilibrio de masas. Información que se recoge, en buena medida, en la monumental obra rusa *Atlas de la Antártida,* de 1966, sujeta hoy a revisión y puesta al día por el Instituto de Investigación del Artico y Antártico de Leningrado bajo la dirección de Evgeny Korotkevich y Grigory Averyanov.

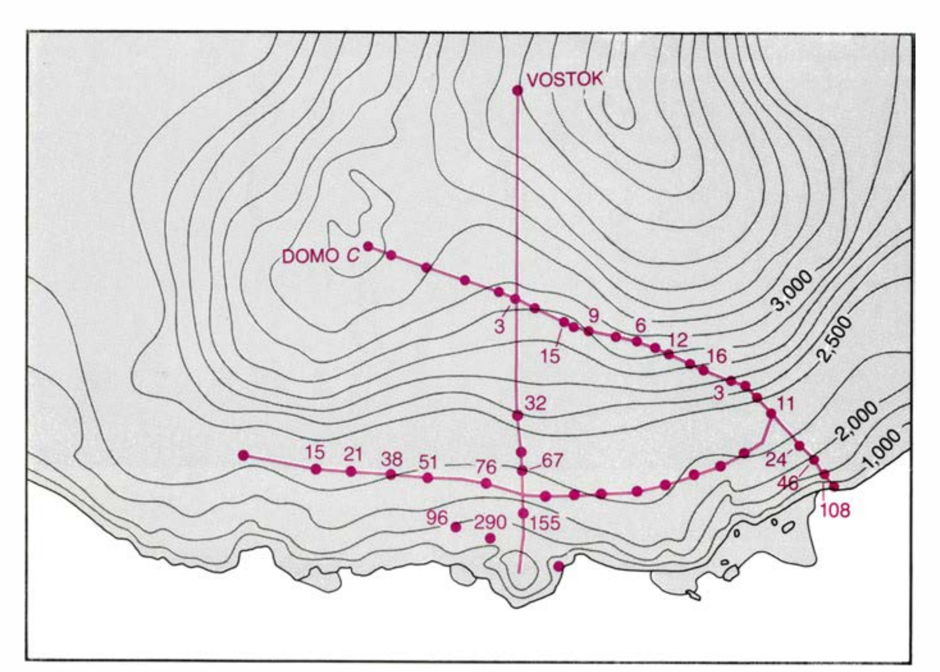
A pesar de la escasez de datos, los principales avances en el conocimiento del régimen del casquete helado provienen de las mediciones del PIGA a lo largo de los perímetros de elevación. En este orden, Ian Allison y sus colegas del grupo antártico australiano han medido las velocidades de flujo del hielo a lo largo de 2000 metros de perímetro del gran entrante relleno por el glaciar de Lambert y la plataforma helada Amery (la tercera en dimensión de la Antártida). Las velocidades medidas son, en general, demasiado bajas para que el hielo se lleve toda la nieve que cae anualmente aguas arriba. Este descubrimiento sugiere que la superficie del hielo continental sube a un ritmo comprendido entre uno y ocho centímetros por año.

Resultados similares a los del PIGA han sido registrados por glaciólogos australianos, así como por el equipo japonés dirigido por Kou Kusunoki (representante del Japón en la junta coordinadora del PIGA) en algunos de los grandes heleros de salida de la Tierra de Enderby, zona oriental del área de estudio del PIGA. Los glaciares parecen guardar cierto equilibrio en las cercanías de la costa, pero ganan masa a partir de los 200 kilómetros del límite de costa tierra adentro. Todas las mediciones referentes a este extremo se recogieron en travesías australianas y rusas que cruzaron la parte oriental del área de estudio del PIGA. En un artículo de próxima aparición, Trevor Hamley y Neal Young, de la División Antártica australiana, y Ian Smith, de la Universidad de Melbourne, sugieren (con una incertidumbre del 10 por ciento) que parte del casquete polar antártico se encuentra próximo al equilibrio constante, mientras que ciertos glaciares de salida quedarían fuera del equilibrio. N.F. McIntyre, de Cambridge, ha llegado por su cuenta a la misma conclusión partiendo de una nueva interpretación de las mediciones efectuadas en el glaciar de Lambert y en la plataforma helada de Amery.

Los datos relativos a la estructura y las propiedades químicas del hielo proceden, sobre todo, de muestras extraídas en múltiples perforaciones de diversos lugares. La mayoría de los sondeos se adentraron varios centenares de metros; los 900 metros de la perforación francesa en el Domo *C* y la perforación rusa (hoy con más de 2000 metros de profundidad) de la estación de Vostok, cuyo objetivo se encuentra a 3700 metros, son casos excepcionales. Los notabilísimos resultados del sondeo de Vostok, que alcanza materiales de 160.000 años de edad, están a punto de salir en *Nature,* preparados por Claude Lorius (representante francés en el consejo del PIGA), Korotkevich y Vladimir Kotlyakov (representantes rusos), Nartsis Barkov, de la Unión Soviética y los franceses Jean Jouzel, Catherine Ritz y Liane Merlivat.

Investigadores del PIGA y otros han estudiado las muestras de sondeo con una serie de métodos macroscópicos, microscópicos y químicos. La inspección macroscópica revela la existencia de capas formadas por fusión o por caída de polvo; se observan así también cambios en el tamaño de los cristales. Alteraciones más sutiles sólo pueden detectarse con aparatos especiales. Un ejemplo lo constituye el pequeño cambio de conductividad eléctrica que da cuenta de una capa ácida producida por la caída de partículas de origen volcánico.

Otro rasgo sutil es la orientación de los cristales de hielo. Se establece examinando mediante luz polarizada las láminas delgadas, obtenidas de las muestras de hielo. La extracción de muestras en distintos lugares y profundidades ha revelado una secuencia característica en la orientación predominante de los cristales, que evoluciona desde la superficie hasta el substrato rocoso. En las capas del techo y de la base, los cristales no representan una disposición preferente. Entre ambas capas, sin embargo, los ejes principales tienden a orientarse según las direcciones determinadas por las deformaciones que sufre el hielo a medida que fluye sobre las grandes estructuras del substrato.



5. SE MIDIO EL FLUJO DE HIELO en múltiples puntos del área investigada por el PIGA. Los valores se representan en el mapa por números de color, que señalan la velocidad en metros por año. Las mediciones fueron tomadas por satélite mediante la técnica Doppler, que se basa en el hecho de que la frecuencia de una señal electromagnética cambia a medida que el transmisor —en este caso el satélite— pasa por delante de un receptor ubicado en el hielo. La localización del punto queda así establecida. Las lecturas que se tornaron a realizar unos meses después muestran la cuantía en que se ha movido el punto.

Las mediciones de laboratorios australianos y franceses relativas a muestras de hielo antártico han mostrado que, para una temperatura y esfuerzo dados, el hielo de la capa más anisótropa (más orientada) se deforma de cinco a diez veces más fácilmente que el hielo orientado al azar de las capas del techo y la base. Este fenómeno se ha confirmado en el campo mediante la observación de cómo el agujero de perforación se inclina y estrecha gradualmente debido al flujo continuo del hielo, después de la extracción del testigo.

El estudio de partículas y elementos traza contenidos en el hielo se ha desarrollado mucho desde el AGI. Lorius y sus colegas de la Universidad de Grenoble lo han impulsado dentro de una unidad mayor de investigación del PIGA. De su trabajo y los estudios coordinados del PIGA se sacan datos para calibrar la contaminación global, así como ideas para el conocimiento de la historia climática. La evaluación de la contaminación del hielo antártico constituye una referencia básica fija, merced a su alejamiento de las actividades humanas y de las regiones volcánicas. El registro climático se ha formado en el hielo por acumulación de nieve, lluvia de partículas y retención de burbujas de aire.

Las partículas y elementos traza llegan al hielo incluidos en los cristales de nieve o caídos de la atmósfera. Aunque un centímetro cúbico de hielo contiene mayor número de impurezas que un centímetro cúbico de aire, los componentes traza son más difíciles de medir en el aire que en el hielo; por este motivo deben emplearse métodos precisos tanto en el estudio de elementos raros como en el de metales pesados y partículas de origen continental. Los análisis se centran en los cambios de concentración recientes (que reflejan episodios volcánicos y quizás el efecto de la actividad humana en el medio ambiente mundial) y en los cambios ocurridos durante y después del último período glaciar, entre 10.000 y 20.000 años atrás (que arrojan luz sobre los procesos y condiciones ambientales de ese tiempo apenas conocido). Además, las profundas muestras extraídas de Vostok permiten examinar ya aspectos similares del último período interglaciar, transcurrido hace 120.000 años, un período tan cálido o más que el presente.

Una comparación de capas de nieve depositadas en el siglo XIX en el Polo Sur en el Domo *C* con otras recientes no han mostrado ninguna tendencia significativa hacia la acidez y concentración de metales pesados que cupiera interpretar como un aumento de la contaminación mundial. La mayoría de los cambios observados reclama un origen volcánico. Por otro lado, la creciente radiactividad de la nieve antártica, producida por pruebas de armas atómicas realizadas desde la II Guerra Mundial, demuestra que sus consecuencias sí han sido realmente mundiales.

Otro descubrimiento clave tiene que ver con el actual debate sobre el efecto ambiental que produce el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera por quema de combustibles fósiles. Los análisis de muestras de hielo realizados por investigadores franceses y suizos han probado que las concentraciones de dióxido de carbono en la era preindustrial se situaban en torno a las 260 partes por millón. Lo que rebaja el valor base admitido hasta ahora, sugiriendo que la reciente acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera pueda haberse producido a mayor velocidad de lo que se pensaba.

Una valiosa información sobre la historia climática nos llega de los isótopos pesados estables del agua: oxígeno 18 e hidrógeno 2 (deuterio). El agua compuesta por estas pesadas moléculas tiende a condensar y precipitar en la atmósfera con mayor facilidad que la que incorpora sus isótopos ligeros: oxígeno 16 e hidrógeno 1. Cuando el agua que queda precipita en forma de nieve en el casquete de hielo, está desprovista de isótopos pesados.

Ese vaciado alcanza su definitivo nivel al formarse el cristal de nieve y antes de incorporarse al casquete de hielo. Se interpreta que el agotamiento o vaciado en el lugar de deposición se halla estrechamente relacionado con la temperatura media de la superficie de éste. De ese modo, las concentraciones isotópicas medidas a lo largo de testigos del sondeo de hielo han sacado a la luz los cambios de temperatura más importantes ocurridos en la región antártica durante el período interglaciar y al final de la última era glaciar, junto con las más bajas fluctuaciones que se han presentado desde entonces. Un hallazgo sorprendente: el período cálido actual, en esta región del oriente antártico, comenzó hace 11.000 años, fecha que adelanta varios miles la generalmente aceptada para el hemisferio Norte.

Las concentraciones isotópicas varían también con los cambios de temperatura estacionales. En regiones con bastante acumulación de nieve, estas variaciones anuales se conservan hasta considerables profundidades en el hielo; ofrecen así un método de datación de la edad que tiene el hielo de determinados niveles de un testigo de sondeo por contaje de capas con diferente concentración de isótopos, es

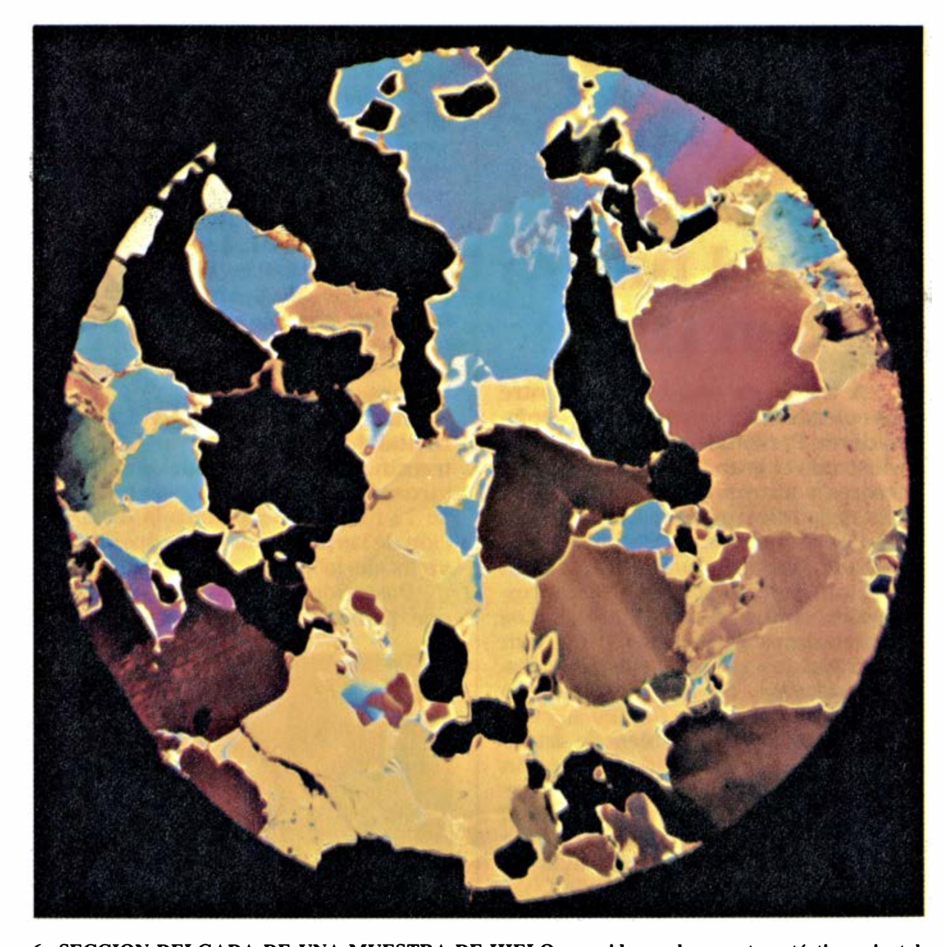
decir, de capas estacionales. El inconveniente del método reside en que en un solo año puede formarse más de una capa caliente y una fría, cuando los fuertes vientos no barren la capa anual íntegra.

Sin embargo, la edad de ciertas capas puede establecerse independientemente, pues el hielo conserva dentro de sí testimonios de grandes acontecimientos de fecha conocida. Ejemplos son la radiactividad creada en la nieve a raíz de las pruebas de la bomba de hidrógeno que marcan las capas de nieve antártica depositadas los años 1954-55, 1958, 1961-62 y 1964, y los elementos traza depositados en la nieve después de cada gran erupción volcánica, como la del Krakatoa en 1883 y Gunung Agung en 1963. Para estimar edades mucho más antiguas, se están introduciendo técnicas que miden cantidades ínfimas de isótopos radiactivos de determinados elementos; tales; plomo, argón, silicio, carbono, cloro y berilio (con vidas medias comprendidas entre 20 años y 1,5 millones de años).

Otros rasgos del pasado se han leído en el aire atrapado en distintas capas de hielo. El aire que se introduce en los huecos existentes entre los cristales de nieve se halla a la misma presión barométrica que el aire de la parte superior del casquete. Cuando los huecos entre los cristales de nieve quedan sellados por el peso creciente de la nieve fresca, el aire atrapado conserva su masa total. A partir de la recuperación del aire de la muestra, este fenómeno permite calcular la presión barométrica inicial. Gracias a ello, Ditmar Jenssen, de Australia, y Dominic Raynaud, de Francia, han reconstruido las alturas de la superficie en el pasado.

Tales mediciones muestran que, hacia fines de la última era glaciar, el hielo del sector de la tierra de Adelia, al este de la Antártida, era, en el interior, de 100 a 200 metros más delgado que hoy, pero de 400 a 500 metros más espeso cerca de la costa. El actual engrosamiento del hielo glaciar interior y adelgazamiento cerca de la costa, ambos sugeridos por las mediciones del PIGA, mantienen una tendencia a largo plazo.

Del estudio de las partículas de polvo



6. SECCION DELGADA DE UNA MUESTRA DE HIELO recogida en el casquete antártico oriental. Examinada aquí con luz polarizada para establecer la orientación de los cristales de hielo. Los distintos cristales se identifican merced a que el color de la luz que trasmite cada uno depende de su orientación. La sección alcanza un espesor de un milímetro y los cristales miden varios milímetros de anchura.

de origen continental recogidas en las muestras de los sondeos en el hielo se saca otra conclusión meteorológica. Ellen Mosley-Thompson y Lonnie G. Thompson, de la Universidad estatal de Ohio, han encontrado, en muestras de viejas capas de hielo, lecturas más altas que en las capas más recientes, descubrimiento que se ha visto confirmado por los glaciólogos franceses. Manifiesta ello que las velocidades del viento en las regiones del globo que fueron desiertos durante la era glaciar alcanzaron valores bastante más altos que las velocidades del viento sobre los desiertos de épocas recientes.

Desde el comienzo del PIGA los investigadores convinieron en la necesidad de que los resultados obtenidos en los diversos estudios se acoplaran y combinaran para crear una amplia visión de conjunto del hielo de la Antártida oriental y su medio ambiente. Aunque la síntesis completa constituye una meta todavía lejana, se ha conseguido avanzar gracias a la construcción (por ordenador) de modelos simplificados del casquete helado y los cambios por él sufridos a lo largo del tiempo.

El desarrollo de los modelos que engloban la termodinámica y dinámica del casquete de hielo fue iniciado por los glaciólogos rusos Petr Shumsky e Igor Zotikov. En el PIGA esta línea de trabajo ha recibido especial impulso con William F. Budd, del grupo antártico australiano, que ha proyectado y dirigido varias investigaciones glaciológicas en las expediciones del grupo antártico australiano desde el inicio del PIGA y representa a Australia en el consejo de este organismo. Budd, Jenssen y el autor han construido el primer modelo detallado del casquete helado de la Antártida oriental al servicio del PIGA. Comenzamos por suponer que el flujo de hielo está absolutamente compensado por la acumulación de nieve, de suerte que el casquete se halla en perfecto estado de equilibrio y no varía su forma con el tiempo. Se pueden usar entonces los principios básicos de física que permitan inferir una multitud de características del casquete.

En el siguiente paso, Budd y Ian Smith generalizaron un modelo desarrollado por Molly Mahaffy, a la sazón en la Universidad de Colorado en Boulder, para simular el levantamiento y hundimiento del casquete helado que ocurre siempre y cuando el aumento local de masa no esté en equilibrio con el flujo de hielo (la fusión puede ser, en general, despreciada). El modelo muestra el desarrollo del casquete empezando por un arrasamiento inicial del substrato rocoso y tomando después en consideración la acumulación, el flujo y la pérdida de hielo.

En el caso de que ni la acumulación ni la pérdida cambien, el hielo termina por alcanzar el estado de equilibrio. La verdad es que nunca se llega a ese estado. El engrosado casquete tiende a enfriar la atmósfera circundante, bajando en consecuencia la tasa de precipitación de nieve. Con el tiempo, la carga creciente del hielo provoca el hundimiento del substrato, bajando igualmente la superficie del casquete de hielo y aumentando su temperatura. Por otra parte, el casi coincidente desarrollo de los casquetes helados del hemisferio Norte debería haber rebajado el nivel del mar, exponiendo tierras sumergidas sobre las cuales pudiera extenderse el hielo antártico. Se sabe que estas evoluciones guardan relación con cambios ocurridos en la radiación solar recibida subsiguientes a las variaciones de la posición y órbita terrestre. Las representaciones simplificadas de estos procesos han permitido a los diseñadores de modelos del PIGA simular el aumento y la disminución del hielo, tanto en la Antártida como en el hemisferio Norte a lo largo del último medio millón de años. Los patrones de simulación muestran notable conformidad con las indicaciones geológicas y con los descubrimientos aportados desde las muestras de sondeos de sedimentos oceánicos.

Para los diseñadores de modelos, los datos acumulados siguen manteniendo el reto que plantea elaborar una historia del casquete helado que se ajuste a los mismos. Los modelos servirían así para predecir el futuro del hielo antártico. Para ello deberían tomarse en cuenta los efectos que sobre el clima de la Antártida ejerce el resto del sistema climático.

Los problemas adquieren un realce especial si los enmarcamos en el actual debate sobre el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, que podría calentar regiones polares y acelerar el movimiento del hielo en regiones externas de la Antártida, en particular las grandes plataformas heladas y flotantes del continente. La investigación del PIGA, atenta a estas inquietudes, se ocupa además de evaluar el importante papel que el gran casquete antártico cumple en la historia y en el futuro del medio ambiente de la Tierra.

Ingeniería de la mariposa

Las mariposas chupan néctar, vuelan y toman el sol para regular su temperatura interna. Bajo esas funciones vitales subyacen mecanismos que pueden estudiarse aplicando principios del análisis ingenieril

Joel G. Kingsolver

Las relaciones entre un organismo vivo y su medio suelen analizarse valiéndose de conceptos extraídos de la biología. Sin embargo, los organismos biológicos y las máquinas están sujetos a las mismas leyes físicas, de modo que también vale analizarlos por medio de conceptos derivados de la ingeniería. Subyacentes a las funciones necesarias para mantener la vida de un ser advertimos diversos mecanismos físicos. Su carácter preciso puede determinar la variedad de medios donde el organismo sobrevive y se reproduce. Simulando los efectos de la alteración de tales mecanismos físicos podremos averiguar cómo contribuyen a la propagación y el éxito evolutivo de un organismo. He aplicado estos principios a la más inverosímil estructura de ingeniería: la mariposa.

Se aprecian algunas diferencias fundamentales, claro está, entre la ingeniería de una máquina y el análisis ingenieril de un ser vivo. El diseñador de una máquina comienza con un conjunto de funciones, formulando después un diseño que cumpla las funciones deseadas con un rendimiento o una producción máximos. El zoólogo que adopta un enfoque propio de la ingeniería invierte el proceso, deduciendo los detalles de la función a partir de las estructuras anatómicas. Además, a diferencia de las máquinas, los organismos se autoconstruyen: cada estructura nueva presenta variaciones sobre la existente. En lugar de analizar una estructura aislada, el ingeniero debe habérselas con relaciones evolutivas entre organismos y con los procesos de desarrollo que producen la estructura. El análisis de índole ingenieril puede aclarar ambos tipos de relaciones.

Tres de las funciones más importantes para la supervivencia y la reproducción de la mariposa son la alimentación, la regulación de su temperatura interna y el vuelo. Este último, al que corresponde un papel fundamental en la biología de las mariposas, constituye un medio de locomoción energéticamente caro, que requiere mucho combustible, selecto además. Para conseguir el combustible, las mariposas se alimentan de néctar, una mezcla de agua y azúcares simples producida en las flores de muchas plantas. La mayoría de los insectos tienen una boca compuesta, pero en la mariposa las distintas partes se han fusionado en una estructura sencilla llamada probóscide: un tubo largo y flexible, completamente enrollado en los momentos de descanso. Durante la alimentación, la probóscide se extiende y su extremo se introduce en la flor.

En el interior de la cabeza de la mariposa se advierte una cavidad cuyo tamaño varía de acuerdo con la acción de los músculos llamados dilatadores cibariales. La contracción de los dilatadores crea una presión de succión que tira del néctar a través de la larga y estrecha probóscide. Desde un enfoque ingenieril, el método de alimentación de la mariposa remeda el proceso en el que el humano sorbe agua de azúcar con una caña. Cualquier aficionado a la horchata o los batidos conoce al menos dos factores que influyen en la eficacia de ese procedimiento: primero, que al alargar o estrechar la caña aumenta la presión necesaria para mover el líquido; segundo, que la presión necesaria para elevar el fluido aumenta también con la viscosidad de la solución.

¿Cómo se asegura la mariposa una rápida toma de energía? El contenido en azúcar del néctar varía considerablemente; se diría que el insecto tomaría energía con la máxima rapidez chupando el más dulce de los néctares a su alcance, pero no es así. Es cierto que el néctar que contega muy poco azúcar proporciona energía a una tasa baja. Pero también lo es que los néctares muy dulces no se extraen a la máxima velocidad. Por una razón: la viscosidad de la solución aumenta rápidamente con el contenido de azúcar. Si el néctar es muy dulce, no puede extraerse con rapidez suficiente para que el insecto obtenga energía al mayor ritmo posible. Por tanto, el néctar óptimo no será ni el más dulce, ni el menos.

El óptimo exacto depende del mecanismo de alimentación de la mariposa. Thomas L. Daniel, de la Universidad de Washington, Peter G. May, de la Universidad de Florida, y el autor analizaron dos mecanismos: uno en que la presión de succión ejercida por el insecto permanecía constante, sin importar el contenido de azúcar del néctar, y otro en que la presión variaba con la concentración de azúcar. Se comprobó que si la presión de succión era constante, el néctar óptimo contenía entre el 20 y el 25 por ciento de azúcar. El óptimo no dependía del tamaño o la forma de la probóscide. Si bien un aumento del diámetro de la probóscide, o una reducción de su longitud, aumentaría la velocidad a que fluye el néctar, el flujo se avivaría para todas las concentraciones de azúcar, no alterándose el óptimo.

Análogamente, si la mariposa pudiera doblar de repente su presión de succión para todas las concentraciones de

1. TRES ESPECIES del género *Colias* de las Montañas Rocosas, cuyas respectivas poblaciones muestran distintos colores de ala en consonancia con la altitud a la que viven. La mariposa de arriba corresponde a una población de la especie *Colias meadii*, que habita altitudes de 3300 a 3600 metros. La central es de una población de *Colias alexandra*, que se encuentra entre los 2700 y 2900 metros. La inferior es *Colias philodice eriphyle*, que vive entre los 1500 y 1700 metros. Las mariposas *Colias* alcanzan la temperatura corporal necesaria para el vuelo tomando el sol con las alas levantadas. Llega al cuerpo la radiación solar que absorbe la cara inferior del ala. La región del ala próxima al cuerpo aporta la mayor contribución al calentamiento del insecto; como se advierte en la ilustración, esa región se oscurece al aumentar la altitud.



azúcar, el ritmo de toma de energía para una solución del 40 por ciento se elevaría bruscamente, pero también lo haría, y en la misma proporción, el de una solución del 25 por ciento. Por otra parte, si la presión de succión se doblara para una solución del 25 por ciento y se triplicara para una del 40 por ciento, el néctar más dulce podría proporcionar energía más deprisa. En efecto, cuando la presión de succión varía con la concentración de azúcar, el néctar óptimo es el que contiene entre el 35 y el 40 por ciento de azúcar. Cierto es que se ignora qué mecanismo emplean la mayoría de las mariposas. Quizá los únicos datos publicados sean los de May, que estudió dos especies y encontró que se valían de un mecanismo de presión variable. Aunque no se conozca el mecanismo de succión que suelan emplear, una elevada frecuencia de retorno a las flores podría constituir un dato importante a la hora de determinar qué flores visitan las mariposas. Estas tienden a alimentarse de plantas que producen néctar con un contenido en azúcar del 15 al 30 por ciento. Por el contrario, las abejas prefieren las plantas que producen néctares con un 30 o 50 por ciento de azúcar.

Una pequeña variación en el mecanismo físico básico de alimentación de las mariposas acarrea implicaciones importantes en las relaciones entre el organismo y el medio. Lo mismo puede decirse de la regulación de la temperatura. Para volar, muchas elevan su temperatura interna hasta los 30 o 40 grados Celsius, nivel al que mantienen su temperatura interna la mayoría de las mamíferos. Estos últimos se calientan aumentando el ritmo de producción metabólica de calor, y se enfrían controlando el flujo circulatorio hacia la superficie del cuerpo. Las mariposas regulan su temperatura a través de mecanismos completamente distintos. Los insectos disponen también de un fluido circulatorio interno, llamado hemolinfa, pero no controlan su flujo con precisión. Además, en vez de elevar el ritmo metabólico, para calentarse la mariposa aumenta su temperatura interna tomando el sol y absorbiendo la radiación solar hasta que puede volar.

Las mariposas toman el sol en diversas posiciones. Cada especie suele adoptar siempre la misma postura. La adoptada por cada especie dependerá en buena medida del mecanismo por el que calienta su cuerpo. Dos son las opciones: las alas absorben la radiación solar y llevan el calor al cuerpo a través del tejido alar, o reflejan la radiación solar directamente hacia la superficie corporal, que la absorbe.

Entre las especies que utilizan la absorción, se distinguen dos actitudes comunes: la postura dorsal y la lateral. En la dorsal, las alas se extienden como las de un avión. En la postura lateral, las alas se mantienen juntas verticalmente sobre el cuerpo. Sea cual fuere la actitud que adopte la mariposa, en la toma de sol por absorción sólo la radiación que incide en la base del ala sirve para aumentar la temperatura del cuerpo. Las alas, ligeras y delgadas, son malas conductoras del calor, por lo que gran parte de la radiación que incide más allá de unos pocos milímetros del cuerpo se disipará.

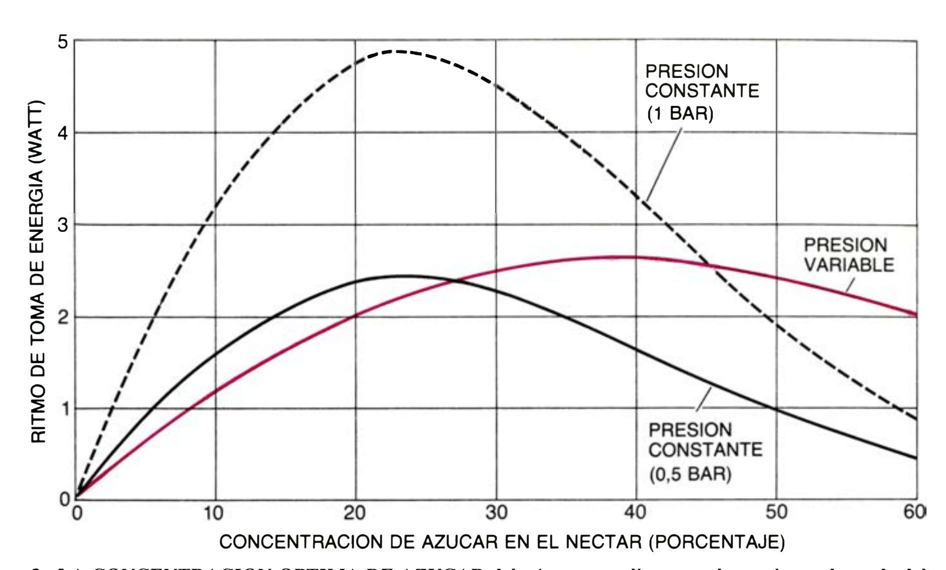
El color desempeña un papel destacado en la termorregulación de la mariposa: determina qué longitudes de onda de radiación absorberá la superficie. El color del ala no responde a la pigmentación del ala propiamente dicha, sino a la de miles de diminutas escamas con forma de placa que la recubren [véase "Patrones de coloración de las mariposas diurnas y nocturnas",

2. LA PROBOSCIDE es un tubo largo y flexible a través del cual se alimenta la mariposa. Durante el vuelo y en reposo, se mantiene enrollada (*abajo, a la derecha*). Al encontrar una flor con néctar, la mariposa desenrolla la probóscide y la introduce en el néctar (*arriba, a la izquierda*). En la cabeza del insecto existe una cavidad que puede dilatarse por medio de los músculos cibariales (*arriba, a la derecha*). La expansión de la cavidad crea una presión de succión que tira del azucarado néctar por el canal.

por H. Frederik Nijhout, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1982]. Cada escama está coloreada por un solo pigmento de los varios que tiene el ala: el color del conjunto se produce por un equivalente biológico del puntillismo de las pinturas de Georges Seurat.

Puesto que la parte del ala cercana al cuerpo es la que más afecta a su temperatura, su color resulta más importante para la regulación de la temperatura que el color de cualquier otra parte del ala. En la mayoría de las que toman el sol lateral o dorsalmente, la base del ala está oscurecida por un pigmento negro, la melanina; la cantidad de melanina determina el oscurecimiento de la base del ala. Ward B. Watt, de la Universidad de Stanford, y el autor estudiaron el patrón de coloración del ala de varias especies del género *Colias,* llamadas también mariposas del azufre. Hallaron que las que vivían en altitudes elevadas presentaban la base del ala más oscura que las de menor altura. Las alas más oscuras son las más eficaces en la absorción y permiten a las especies de altitudes elevadas aprovechar al máximo la radiación solar en sus hábitats más fríos.

La toma de sol por reflexión comporta un conjunto de problemas de ingeniería netamente diferentes. La absorción y la reflexión de una superficie guardan una mutua relación inversa. Las superficies oscuras, buenas absorbentes, son malas reflectoras. Las alas deben ser blancas o plateadas para reflejar eficazmente la luz del sol hacia el cuerpo. De hecho, al grupo más importante de las que toman el sol por reflexión se las llama blancas, precisamente por el color de la superficie superior del ala: entre ellas, el género *Pieris*. Las que toman el sol por reflexión suelen mantener las alas formando cierto ángulo por encima del cuerpo, en una configuración que semeja una V. El ángulo de la V influye considerablemente en la cantidad de luz reflejada que alcanza al cuerpo.



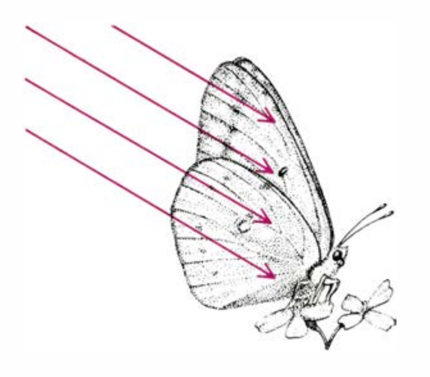
3. LA CONCENTRACION OPTIMA DE AZUCAR del néctar que alimenta a la mariposa depende del mecanismo de aspiración del líquido. La concentración óptima es la que produce el mayor ritmo de toma de energía. El gráfico muestra cómo varía el ritmo de toma en función de la concentración de azúcar para tres métodos de succión ligeramente distintos. Si la mariposa ejerce una presión constante pequeña, la concentración óptima se sitúa entre el 20 y el 25 por ciento (*curva negra continua*). Si la mariposa ejerce una presión constante mayor, la velocidad de toma de energía de todas las concentraciones aumenta, pero el óptimo no varía (*curva negra a trazos*). Sin embargo, cuando la presión aumenta con la concentración de azúcar, el néctar óptimo contiene alrededor del 35 por ciento de azúcar (*curva de color*). Las curvas de presión constante son hipotéticas. La curva de presión variable es de la *Agraulis vanillae,* la fritilaria del golfo, medida por Peter G. May, de la Universidad de Florida. (El néctar más dulce no es óptimo porque la viscosidad aumenta con la concentración de azúcar y cuesta succionar los néctares viscosos.)

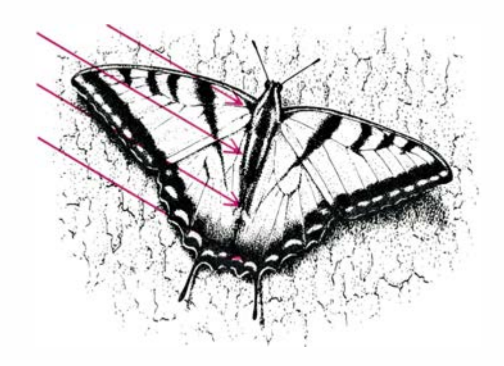
Cuando un haz de radiación entra en la V, se refleja atrás y adelante entre las alas hasta incidir en el cuerpo, o salir reflejado sin alcanzarlo [*véase la figura 5*]. Los haces que chocan inicialmente con la región interior del ala alcanzan el cuerpo; los que chocan con la región exterior, no. El ángulo en que se mantienen las alas determina la proporción entre las dos regiones. Si la V es amplia, sólo la radiación reflejada desde una pequeña región de la base del ala se transmitirá al cuerpo. Si es estrecha, la radiación llega al cuerpo procedente de una región mucho mayor, desde el borde del ala, presumiblemente. Cada especie de mariposa *Pieris* tiene una configuración característica para tomar el sol y un patrón de coloración del ala correspondiente, en el que el tono del borde varía según influya en la temperatura del cuerpo.

Aunque el color del ala resulta muy importante, existen al menos otros dos factores anatómicos que influyen en la temperatura del cuerpo. El de la mariposa consta de tres partes: cabeza, tórax y abdomen. Las patas y las alas están sujetas al tórax: la temperatura torácica tiene una regulación más estrecha que la temperatura de las otras partes del cuerpo. Sin embargo, al existir un flujo de hemolinfa entre el abdomen y el tórax, la temperatura del abdomen puede afectar a la del tórax. En las que toman el sol dorsalmente, el abdomen está situado a menudo a la sombra de las alas, reduciendo por tanto la temperatura torácica. Las que toman el sol por reflexión pueden elevar el extremo del abdomen por encima de las alas, hasta una posición donde interceptan mucha luz reflejada, aumentando la temperatura torácica. Además, el tórax de la mariposa se protege con una cubierta pilosa de escamas muy modificadas. Esta cubierta es aislante, y puede ser muy gruesa en las especies que viven en altitudes elevadas o en latitudes septentrionales.

La capacidad para alcanzar la temperatura corporal necesaria para volar es fundamental en la biología de muchas mariposas. Todas las actividades principales del ciclo vital del insecto necesitan del vuelo, incluyendo la alimentación, la búsqueda de pareja y la puesta de huevos. Varios estudios recientes desarrollados en los Estados Unidos y en Europa han mostrado que el éxito reproductor está limitado parcialmente por el tiempo que la hembra es capaz de volar en busca de plantas apropiadas para la puesta. Ello se debe, en parte, a que muchas tienen un período de vida adulta inferior a la semana. Las condiciones climáticas inflyen decididamente en que una mariposa pueda calentarse lo suficiente para despegar, condicionando su éxito reproductor.

Aprovechando un estudio de ingeniería, Robert J. Moffat, de la Universidad de Stanford, y el autor desarrollaron modelos matemáticos en los que se relacionaba las características físicas que afectan a la regulación de temperatura, como el color del ala, con las condiciones climáticas en que puede volar un determinado insecto. Las relaciones pueden representarse gráficamente por medio de un "espacio de vuelo", idea original de Warren P. Porter, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y David M. Gates, de la Universidad de Michigan. En un plano cuyas coordenadas representan la temperatura del aire y la velocidad del viento, el espacio de vuelo de una especie es el área que in-





4. TOMA DE SOL POR ABSORCION: las alas absorben la radiación solar y conducen la energía térmica al cuerpo. Se logra adoptando dos posturas principales. Las mariposas de toma de sol lateral mantienen las alas juntas por encima del dorso (*izquierda*). Las de toma de sol dorsal extienden las alas de lado (*derecha*). Cada especie suele adoptar una sola actitud para solearse. Que sea el color de la superficie superior del ala o el color de la inferior el que afecte a la temperatura corporal depende de qué postura se adopte. Las tres especies de *Colias* mostradas en la primera figura son de toma de sol lateral.

cluye todas las condiciones bajo las cuales esa especie puede calentarse lo suficiente para arrancar el vuelo [*véase la figura 7*].

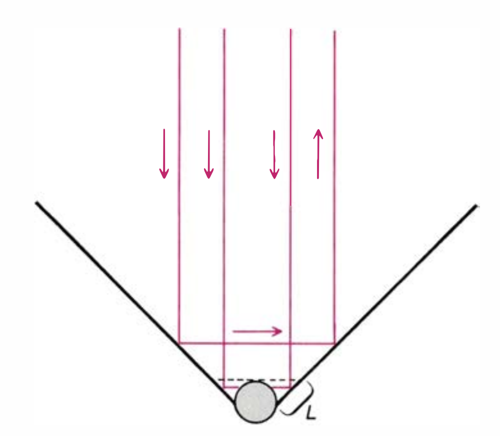
Comparando los espacios de vuelo de diferentes especies se observa cómo influye el color de las alas en la gama de condiciones climáticas en las que puede despegar la mariposa. Cotéjense, por ejemplo, los espacios de vuelo de las dos especies de *Colias* estudiadas por Watt y el autor. Ciertas poblaciones de la especie *Colias pholidice eriphyle* se encuentran en altitudes comprendidas entre los 1500 y 1800 metros. Las poblaciones de la especie *Colias meadii,* que tiene la base del ala notablemente más oscura, habitan entre los 3300 y los 3600 metros. La representación de los espacios de vuelo de las dos especies muestra que las diferencias de color del ala se cuentan entre los mecanismos por los que mariposas estrechamente emparentadas se adaptan a las condiciones ambientales locales. Por otra parte, el modelo matemático predice que las especies de baja altitud no lograrían volar a altitudes más elevadas porque no alcanzarían la temperatura corporal necesaria para el vuelo. Los experimentos en los que transplanté especímenes de *C.p. eriphyle* a laderas montañosas altas y frías demostraron que la predicción era correcta.

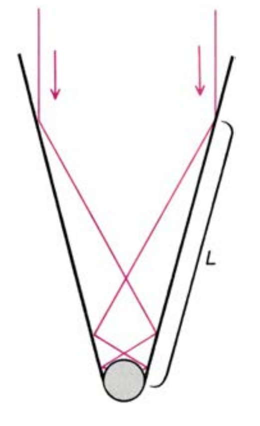
Los mecanismos físicos que subyacen a la alimentación y la termorregulación de la mariposa dependen de principios físicos observables en el funcionamiento de muchas máquinas. Por el contrario, algunos de los mecanismos utilizados por las grandes mariposas para volar parecen diferir por completo de los implicados en las máquinas voladoras. Sólo recientemente las investigaciones de laboratorio han empezado a arrojar luz sobre los originales principios del vuelo de la mariposa. Muchas mariposas grandes vuelan utilizando una técnica de "aleteo y planeo", en la que se alteran períodos de aleteo con otros de planeo. La técnica de aleteo y planeo no es común entre los insectos, aunque algunos saltamontes y libélulas la usan bastante.

Los mecanismos de la fase de planeo del vuelo de la mariposa se conocen mejor que los de la fase de aleteo. El planeo guarda mayor parecido con el funcionamiento de una superficie sustentadora clásica, como un ala de avión. Cuando un planeador artificial desciende, se mueve a lo largo de la senda de planeo con las alas en posición fija. La forma del ala y su ángulo respecto del flujo de aire hacen que éste se mueva más deprisa por encima de la superficie superior del ala que por debajo de la superficie inferior. La diferencia de velocidad produce una diferencia de presiones entre las superficies superior e inferior. Esta, a su vez, genera una fuerza neta dirigida hacia arriba y perpendicular a la dirección del movimiento de la nave. Tal fuerza se llama sustentación.

El flujo de aire alrededor del ala durante el planeo es muy complejo. Para analizarlo resulta útil a veces describirlo como una combinación de dos modelos mucho más simples: traslación y circulación. La idea de traslación describe un modelo de flujo en el que el aire se mueve en dirección opuesta a la del movimiento del ala. La circulación es equivalente a un movimiento de giro neto del aire alrededor del ala. La traslación y la circulación son abstracciones, y la descripción del flujo de aire en términos de traslación y circulación es cuestión de conveniencia analítica. En realidad no hay movimiento de aire desde la superficie inferior del ala a la superior, que sí habría si existiera un movimiento de giro. No obstante, puede demostrarse matemáticamente que el comportamiento real del flujo de aire semeja al que se observaría si se combinaran los dos modelos más simples. Como veremos, la traslación y la circulación son de gran ayuda en la comprensión del vuelo en flotación de las mariposas.

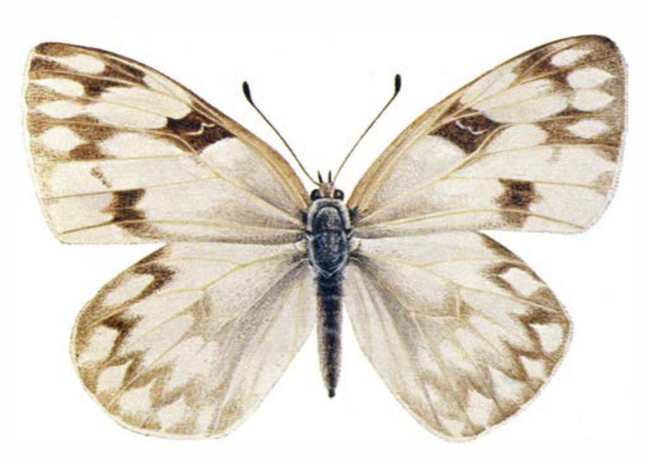
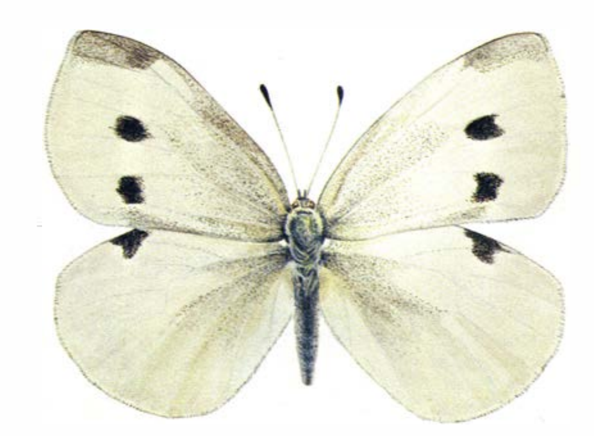
Cuando una mariposa planea, sus alas crean sustentación de forma muy parecida a como lo hacen las alas de una aeronave. Sin embargo, se aprecian diferencias importantes entre la aeronave y el organismo. En el funcionamiento de una superficie sustentadora clásica, la principal fuerza de oposición al avance del ala es la resistencia. Esta resulta del rozamiento entre la superficie del ala y el aire y de la diferencia de presiones entre la parte delantera y la trasera del ala. La eficacia de una superficie sustentadora se mide por la relación entre la sustentación y la re-





5. TOMA DE SOL POR REFLEXION: aprovecha la reflexión de la radiación solar en las superficies superiores del ala. En la toma de sol por reflexión, las alas se mantienen levantadas formando una V cuyo ángulo puede variar considerablemente. Algunas especies de toma de sol por reflexión mantienen las alas en una V ancha (*izquierda*). En ese caso, sólo se reflejan hacia el cuerpo los haces que chocan inicialmente con una pequeña región del ala (*L*). Otras especies mantienen las alas en una V más estrecha (*derecha*). Al angostarse la V, aumenta la región desde la que los haces se reflejan hacia el cuerpo. Si la V es muy cerrada, los propios bordes de las alas llegan a reflejar parte de la radiación hacia el cuerpo.



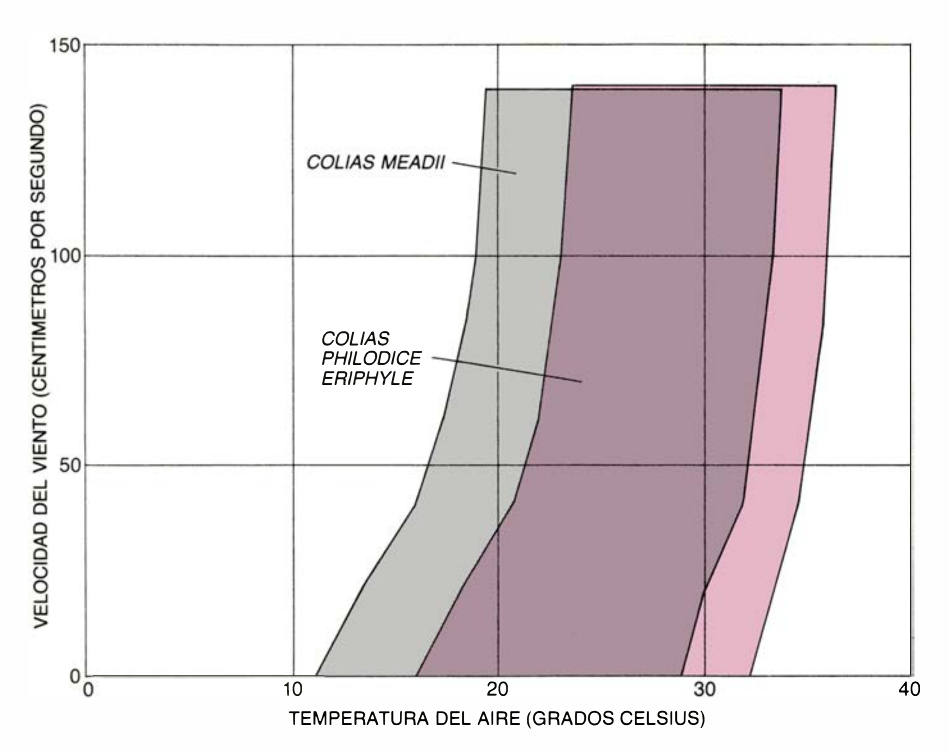
6. LAS MARIPOSAS *PIERIS* son de toma de sol por reflexión; los patrones de coloración de su ala se relacionan con las condiciones climáticas y el ángulo alar adoptado para tomar el sol. Evidentemente, en la toma de sol por reflexión, las zonas claras del ala proporcionan más calor al cuerpo que las oscuras. La mariposa de arriba, a la izqierda, es *Pieris occidentalis;* la de abajo, a la izquierda, es *Pieris protodice*. Pertenecen al subgénero *Pontia,* cuyos miembros mantienen las alas en una V ancha al tomar el sol. Resultado de esa posición es que el color del borde exterior del ala no afecta a la temperatura corporal, y ambas especies de *Pontia* tienen allí grandes zonas oscuras. La mariposa de arriba, a la derecha, es *Pieris napi macdunnoughii;* la de abajo, a la derecha, es *Pieris rapae*. Son del subgénero *Artoegia,* cuyos miembros adoptan una V estrecha en la toma de sol. El color del borde exterior afecta a la temperatura corporal; ambas especies de *Artogeia* tienen en esa zona colores muy claros. Las dos mariposas superiores proceden de Gothic, Colorado, situado a una altitud de 2900 metros; las dos inferiores son de Delta, Colorado, a 1500 metros. Las mariposas presentadas utilizan tanto la toma de sol por absorción como por reflexión, advirtiéndose así en la muestra que las especies de altitudes elevadas presentan las bases del ala más oscuras.

sistencia. Las alas artificiales se diseñan cuidadosamente para alcanzar altas relaciones.

El ala de una mariposa ofrece una relación baja entre sustentación y resistencia, y en este sentido es una superficie sustentadora bastante mala. Sin embargo, se aplica otro criterio para estimar las actuaciones de un planeador: la capacidad para permanecer en vuelo durante períodos largos. En este otro aspecto, la mariposa es un buen planeador. Cuando la mariposa planea, desciende lentamente. La baja velocidad de descenso se debe a la forma del ala del insecto, que puede compararse a la de los paracaídas. La forma cóncava de un paracaídas y la gran extensión de la superficie perpendicular a la dirección de descenso producen una fuerza de resistencia importante opuesta a la fuerza de gravedad. Así como la fuerza de resistencia frena el descenso de la persona que cuelga del paracaídas, la resistencia sobre las alas anchas y planas de la mariposa sirve para frenar el descenso del insecto. En efecto, gran parte de lo que parece ser planeo en las mariposas podría denominarse paracaidismo, con mayor precisión. Cuando la mariposa flota en el aire, la intensa fuerza de resistencia produce una baja relación entre sustentación y resistencia, pero también una baja velocidad de descenso.

La fase de aleteo del vuelo de la mariposa es más compleja que la de planeo. Las complejidades se reducen algo al analizar la flotación. En la flotación no hay movimiento neto horizontal ni vertical, aunque las alas y el cuerpo pueden cambiar de posición. Las mariposas diurnas y nocturnas pertenecen a ese nutrido grupo de organismos capaces de vuelo en flotación, que incluye a otros muchos insectos y a los colibríes. Cuando el volador flota, las aves se mueven a lo largo de un complejo ciclo cuya repetición mantiene al pájaro o insecto en el aire.

Si se pudiera frenar el rápido movimiento cíclico y observarlo desde un lado, se advertiría que en la mayoría de los flotadores, colibríes y muchos insectos incluidos, el eje mayor del ciclo es casi horizontal. Las alas se mueven sobre todo de atrás adelante, y la amplitud del movimiento vertical es pequeña. En este caso, se dice que el ciclo tiene un plano de recorrido horizontal. Un ciclo con ese tipo de recorrido, horizontal, puede analizarse como si el ala fuera una superficie sustentadora. El ala se mueve siguiendo un dibujo en ocho cuyo eje mayor se sitúa en el plano horizontal. Al moverse a lo largo de esa trayectoria, el ala crea una fuerza de sustentación que puede calcularse en cada instante del ciclo. Sumando la fuerza de sustentación a lo largo de un ciclo completo se obtiene la sustenta-



7. EL ESPACIO DE VUELO representa de forma gráfica las condiciones climáticas en las que una determinada especie de mariposas alcanza la temperatura corporal adecuada al vuelo. Representando los espacios de vuelo de dos especies se plasma la ventaja que para esos insectos supone la coloración apropiada del ala. La zona gris corresponde al espacio de vuelo de *Colias meadii,* especie de gran altitud mostrada en la parte superior de la figura 1. El color oscuro del envés de su ala le permite volar en ambientes fríos. La zona de color corresponde al espacio de vuelo de *Collies philodice eriphyle,* especie de baja altitud mostrada en la parte inferior de la figura 1. El envés de su ala es de color claro, lo cual le proporciona un espacio de vuelo bien adaptado a las condiciones climáticas reinantes en altitudes bajas, más caldeadas.

ción media que mantiene en el aire al flotador.

Si se pudiera frenar el ciclo en que se mueven las alas de la mariposa y observarlas desde un lado, se apreciaría un modelo muy distinto. Un trabajo reciente de Charles P. Ellington, de la Universidad de Cambridge, muestra que el ciclo de la mariposa comprende movimientos verticales de gran amplitud. En vez de un plano de recorrido horizontal, el movimiento de la mariposa tiene un plano de recorrido vertical. Aunque el ciclo es en gran parte vertical, guarda semejanza con el recorrido de un remo. En el recorrido hacia abajo, el ala se mantiene perpendicular a la dirección de su movimiento, mientras que en el recorrido hacia arriba se "pone en bandera", quedando paralelo a la dirección del movimiento. Que sepamos, las mariposas son los únicos organismos que emplean un plano de recorrido vertical en el ciclo de flotación.

Un ciclo con plano de recorrido vertical, como su contrapartida orientado horizontalmente, incluye traslación y circulación. Pero un ciclo orientado verticalmente no puede analizarse como si el ala fuera una superficie sustentadora. Para sumar la sustentación creada por una superficie a lo largo de un ciclo completo (como puede hacerse cuando el plano de recorrido es horizontal), es necesario suponer que las fuerzas que actúan sobre el ala en cada instante son independientes de las fuerzas generadas en los instantes precedentes. La suposición funciona razonablemente bien para ciclos en los que la amplitud del movimiento vertical es pequeña. Sin embargo, en un ciclo con un recorrido vertical amplio aparecen alrededor del ala complejos comportamientos del flujo de aire. El resultado es que el flujo en un instante determinado condiciona el flujo en el instante siguiente. La hipótesis de independencia se viola y se dice que el ciclo presenta "flujo no estacionario".

Torkel Weis-Fogh, de Cambridge, ha descrito admirablemente un mecanismo que produce empuje hacia arriba en condiciones de flujo no estacionario. Este mecanismo, que se llama batimiento ("fling"), pone el énfasis en el rápido desarrollo de la circulación. Al comenzar el batimiento, las alas se mantienen unidas verticalmente sobre el dorso. Las alas se separan primero por los bordes de ataque, próximos a la cabeza [*véase la figura 8*]. El espacio que queda entre los bordes de ataque se ensancha a medida que las alas se abren rápidamente alrededor de la línea definida por los bordes de salida. El movimiento de batimiento crea una circulación alrededor de los bordes de ataque, desde las superficies inferiores de las alas hacia el espacio abierto entre las superficies superiores. La circulación se mantiene en el ala durante el recorrido descendente, generando una fuerza ascensional.

Se conocen muchos insectos pequeños que utilizan el batimiento, pero raramente se observa en especies mayores. Ellington demostró que si las alas son grandes, la circulación tiende a separarse de la superficie superior del ala, lo que reduce su capacidad para generar una fuerza ascendente. Sin embargo, existe una forma de eludir el problema. Si las alas son suficientemente flexibles para despegarse gradualmente del borde de ataque, la circulación permanece confinada en el ala en el recorrido hacia abajo, produciendo la fuerza hacia arriba. Las mariposas son los mayores voladores que utilizan el batimiento, y Ellington ha demostrado que se sirven del movimiento de separación gradual.

Mis estudios iniciales sugieren que la flexibilidad necesaria para el movimiento de separación está estrechamente relacionada con la nervadura del ala de la mariposa. Las venas del ala forman un conjunto de montantes rígidos, cubiertos por una membrana flexible. Las mariposas tienen muchas menos venas en el ala que la mayoría de los insectos, especialmente en el borde exterior, en la región más alejada del cuerpo. Las venas principales salen desde la base del ala hacia el exterior. De las venas principales, la del borde de ataque es la más dura. Excepto en la región central, conocida como célula discal, hay pocas venas perpendiculares a las que salen de la base del ala. Resultado de esta distribución venosa es que el borde exterior del ala es muy flexible. Además, se advierte gran flexibilidad entre el borde de ataque y el de salida, conocida como flexibilidad de la cuerda.

Parece que la dureza del borde de ataque y la flexibilidad de la cuerda son esenciales para el movimiento de separación. No hay músculos en el ala misma, y la separación debe realizarse por la contracción de los músculos de vuelo de la base del ala. La contracción de esos músculos dirige el duro borde de ataque en su recorrido hacia abajo. La flexibilidad de la cuerda del resto del ala hace que el movimiento del borde de ataque se traduzca en una separación gradual que va hacia atrás, desde el borde de ataque hasta el de sa-

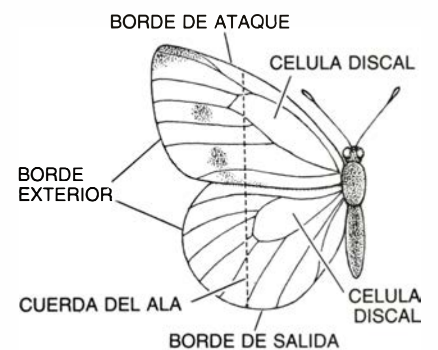
lida. Debido a la gran flexibilidad del borde exterior del ala, otra separación corre hacia abajo, desde el extremo superior del borde de ataque hasta el cuerpo.

La pequeña nervadura del ala de la mariposa permite que el insecto realice la separación. Pero el propio patrón de nervadura impide que las venas del ala se utilicen como conductos fluidos para regular la temperatura corporal. Este principio de beneficio y perjuicio combinados observado en las venas del ala tiene una aplicación más general. Todas las estructuras anatómicas principales de la mariposa desempeñan un papel en varias funciones, y una cualidad útil para un propósito puede resultar muy restrictiva para otro. Al diseñar una máquina para varias funciones, el diseñador procura obtener el mayor rendimiento combinado de funciones. Por analogía con la máquina, el ala de la mariposa puede considerarse el mejor compromiso entre varias funciones decisivas.

Sin embargo, no hay razón para pensar que los organismos biológicos representen diseños óptimos, puesto que se autoconstruyen y evolucionan. Un punto de vista alternativo es que las diversas estructuras anatómicas establecen restricciones dentro de las cuales se cubren las funciones necesarias y se evoluciona. El efecto de tales limitaciones puede demostrarse comparando dos especies de *Colias*. A diferencia de las especies descritas anteriormente, se trata de especies hipotéticas, correspondientes a extremos de adaptación. El color del ala en las *Colias* resulta de la combinación de dos pigmentos: el pigmento negro, melanina, y un pigmento amarillo-anaranjado, la pteridina. Las proporciones relativas de los dos pigmentos determinan el color del ala de cada especie. Por tanto, junto con la piel, la pigmentación limita la gama de medios ambientales en los que las mariposas del azufre pueden vivir.

Como he explicado, las *Colias* son de toma de sol lateral, en las que el grado de oscurecimiento del ala aumenta con la altitud. Así, una hipotética especie

1 2 3 4 5 6



8. BATIMIENTO DE SEPARACION que le permite el despegue a la mariposa *Pieris*. Se recoge en esta secuencia de dibujos basada en parte en los trabajos de Charles P. Ellington, de la Universidad de Cambridge. En un principio se encuentran las alas levantadas y unidas (*1*). Al comenzar el batimiento, los bordes de ataque (próximos a la cabeza) se separan (*2*). Avanza la separación hacia los bordes de salida, al tiempo que se genera una circulación del aire alrededor del ala (*3*). Cuando la separación alcanza los bordes de salida y las alas se despegan se inicia el recorrido de batimiento hacia abajo (*4*). A lo largo de todo él se mantiene la circulación sobre el ala, con lo que se genera una fuerza ascendente. Al final del recorrido hacia abajo, la circulación, hasta entonces confinada en el ala, rompe en forma de torbellino anular (*6*). Las alas se elevan inmediatamente para dar otro golpe hacia abajo. La anatomía del ala de la mariposa contribuye notablemente a su capacidad de vuelo por batimiento y separación (*arriba*). El patrón de nervadura del ala produce un duro borde de ataque y gran flexibilidad en la cuerda del ala.

de baja altitud tendría las alas completamente amarillas y una capa fina de piel; una hipotética especie de elevada altitud tendría las alas completamente negras y una gruesa capa de piel. Al representar los espacios de vuelo de estas dos especies hipotéticas, se encuentra que difieren mucho más que los espacios de vuelo de las especies reales que comparamos anteriormente. Por supuesto, difieren todo lo que pueden diferir dos especies dentro de las restricciones impuestas por este sistema.

Desde luego, algunos medios caen fuera de los límites impuestos por el sencillo sistema de dos pigmentos. Para describir las especies que podrían vivir en ellos deben relajarse las restricciones. Supongamos que se añade un pigmento blanco a los otros dos, así como una forma adicional de termorregulación, la toma de sol por reflexión. Estas adiciones extienden los límites del esquema hasta incluir las mariposas *Pieris.* Con tres pigmentos y tres posturas de toma de sol se pueden describir los espacios de vuelo de todas las mariposas de la familia Pieridae, que incluye a las blancas y a las del azufre. Continuando el proceso de relajación de las restricciones, categorías taxonómicas más amplias caen dentro de los límites. Incluyendo algunas características que no se encuentran en las Pieridae, como la generación de calor metabólico antes del vuelo y la regulación de la circulación de hemolinfa, se abarcan a todos los insectos del orden Lepidoptera, que engobla las mariposas diurnas y nocturnas.

De esta forma, va descubriéndose el significado funcional de las categorías taxonómicas. En algunos casos, éstas pueden mostrar diferencias en rasgos funcionales específicos, como las relativas a la postura de toma de sol y a la pigmentación del ala en los géneros *Pieris* y *Colias.* Puesto que ciertas características, como la pigmentación del ala, están genéticamente determinadas, el sistema de restricciones también da una idea de las relaciones evolutivas entre los organismos. Por ejemplo, el análisis por ingeniería permite decir cuánto afectaría a su gama de hábitats una mutación que añadiera un tercer pigmento al ala de una mariposa *Colias.* Combinando el análisis ingenieril con el estudio de las relaciones evolutivas se empieza a comprender cómo condicionan los mecanismos físicos a los cambios evolutivos, hasta conformar la delicada estructura que permite revolotear en el aire a la mariposa.

Juegos de ordenador

Un microscopio computarizado escudriña el objeto más complejo de la matemática

A.K. Dewdney

El conjunto de Mandelbrot cavila, en silente complejidad, en el centro de una vasta lámina bidimensional de números, llamada plano complejo. Cuando a estos números se les aplica reiteradamente una cierta operación, los situados en el exterior del conjunto huyen, despavoridos, hacia el infinito. Los números del interior permanecen en él, donde danzan y vagabundean de un lado a otro. En la proximidad de la frontera, erráticos vaivenes de minuciosa coreografía, señalan el comienzo de la inestabilidad. Acontece aquí una infinita regresión de minucioso detalle, que nos deja estupefactos por su variedad, su complejidad y su insólita belleza.

El conjunto recibe su nombre en honor de Benoit B. Mandelbrot, investigador numerario del Centro de Investigación Thomas J. Watson de la IBM en Yorktown Heights, Nueva York. A partir de sus trabajos con formas geométricas, Mandelbrot ha desarrollado un campo llamado geometría fractal, estudio matemático de formas que tienen dimensión fraccionaria. En particular, la frontera del conjunto de Mandelbrot es una fractal, aunque también es mucho más.

Merced a un programa relativamente sencillo, un ordenador puede convertirse en una especie de microscopio con el que observar la frontera del conjunto de Mandelbrot. En teoría, se puede escudriñar cualquier porción del conjunto, y hacerlo con tanta aproximación como se quiera [*véase la portada de este número y las figuras 1 a 3*]. Desde la lejanía, el conjunto recuerda un ocho gordezuelo, yacente sobre un costado y cubierto de verrugas. El interior de la figura es de negrura siniestra; la envuelve un halo blanco azulado, como de arco eléctrico, que va dando paso a azules cada vez más profundos y a bandas negras, conforme nos adentramos en los dominios más exteriores del plano.

Al acercarnos al conjunto de Mandelbrot, descubrimos que cada verruga es una diminuta figura de forma muy similar a la del conjunto paterno. Sin embargo, al hacer *zoom* con nuestro microscopio, para observar con más detalle estas diminutas figurillas, se abre ante nosotros un motivo de muy diferente diseño: una lujuriante orgía de zarcillos y volutas de aspecto orgánico, que se abren en espiras y verticilos y en hileras. Al amplificar una voluta se nos revela todavía una nueva escena: la voluta está formada por pares de verticilos entrelazados por puentes de filigrana. La ampliación del puente muestra otras dos espiras que brotan de su centro. En el centro de este centro, por así decirlo, se encuentra un puente cuádruple con cuatro volutas más, y en el centro de éstas, otra versión del conjunto de Mandelbrot.

Mas la versión amplificada no es del todo igual al conjunto de Mandelbrot. Al seguir amplificando parecen ir reapareciendo objetos similares, en los que una inspección minuciosa revela siempre nuevas diferencias. La situación prosigue indefinidamente, siempre igual, siempre infinitamente diferente y sobrecogedoramente encantadora.

Describiré aquí dos programas de ordenador, que exploran ambos los efectos de la iteración de operaciones como la que engendra al conjunto de Mandelbrot. El primero de estos programas generó las ilustraciones en color que vemos en el artículo de este mes. El programa puede ejecutarse en ordenadores personales que dispongan de programación y material adecuados para la generación de gráficos. El programa generará imágenes satisfactorias aun cuando solamente se tenga acceso a un sistema monocromo. El segundo programa está dirigido a lectores que, como yo, tengan necesidad de un ocasional retiro, y abandonando las complejidades sin cuento de lo infinito, busquen refugio en la aparente simplicidad de lo finito.

El término "complejo" se utiliza aquí con dos significados. El ordinario es, evidentemente, adecuado para describir el conjunto de Mandelbrot. Pero el término tiene también un segundo sentido, más técnico. Un número es complejo cuando consta de dos partes, que por razones históricas se llaman "parte real" y "parte imaginaria". Estas expresiones carecen hoy de significado especial; las dos partes de un número complejo podrían muy bien llamarse "abscisa" y "ordenada". Así pues, $7 + 4i$ es un número complejo, cuya parte real es 7 (abscisa) y cuya parte imaginaria es 4 (ordenada). La letra i latina que sigue inmediatamente al 4 expresa cuál de los dos términos del número complejo es la parte imaginaria.

Todo número complejo puede representarse mediante un punto del plano; y recíprocamente. Cuando se establece esta correspondencia entre puntos y números, se habla del plano complejo. Para situar a $7 + 4i$ en el plano complejo se parte del número complejo 0, que es $0 + 0i$, y se toman siete unidades hacia el este, y cuatro hacia el norte. El punto resultante representa $7 + 4i$. El plano complejo es una infinidad no numerable de tales números. Sus partes reales e imaginarias tanto pueden ser positivas como negativas, y lo mismo ser números enteros que expresiones decimales.

La adición y la multiplicación de números complejos es sencilla. Para sumar $3 - 2i$ con $7 + 4i$ se suman por separado las partes reales y las partes imaginarias; en nuestro ejemplo, la suma es $10 + 2i$. La multiplicación de números complejos apenas si es un poco más difícil. Por ejemplo, si se manejase el símbolo i de igual modo que la x del álgebra ordinaria, el producto de $3 - 2i$ por $7 + 4i$ sería $21 + 12i - 14i - 8i^2$. En este momento entra en juego una especialísima propiedad del símbolo i: ocurre que $i^2 = -1$. La expresión desarrollada se puede entonces simplificar, reduciendo términos semejantes, y da $29 - 2i$.

Cabe ahora describir el proceso iterativo que engendra al conjunto de Mandelbrot. Se parte de la expresión $z^2 + c$, donde z es un número complejo que puede tomar distintos valores (una variable), y c es un cierto número complejo fijo. Hagamos, inicialmente, que z sea igual al número complejo 0. El cuadrado de z es estonces 0, y el resultado de sumarle c a z^2 es, sencillamente, c. Ahora sustituyamos por el valor así obtenido la z de la expresión $z^2 + c$. La nueva suma es $c^2 + c$. Volvamos a sustituir la z por este valor. La suma siguiente es $(c^2 + c)^2 + c$. Prosigamos con este proceso, tomando siempre el resultado del último cálculo como valor inicial para el nuevo.

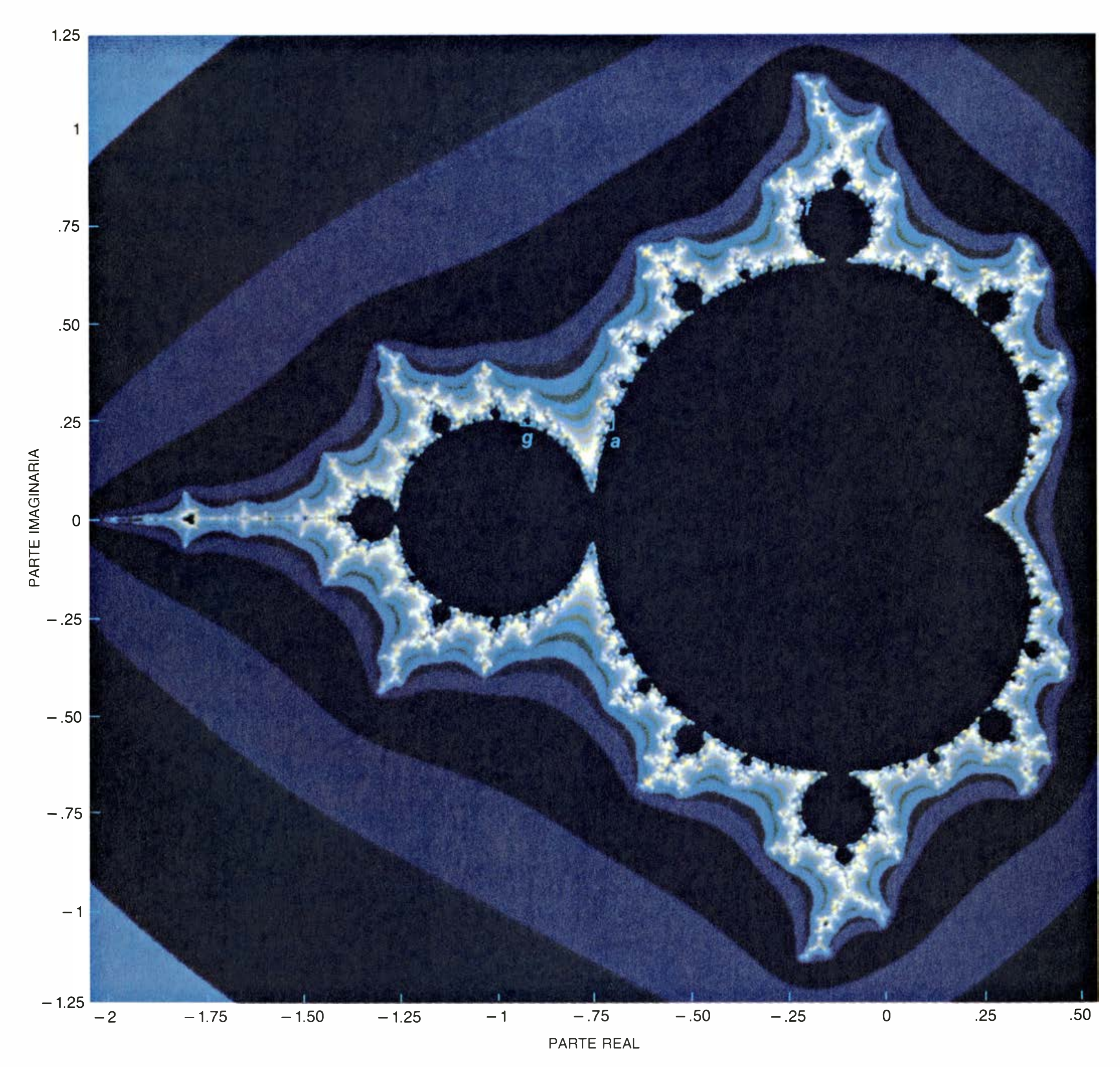
Al realizar las iteraciones para valores particulares de c ocurren cosas extraordinarias. He aquí, por ejemplo, lo que sucede cuando c es $1 + i$:

primera iteración,	$1 + i$
segunda iteración,	$-7 + 7i$
tercera iteración,	$1 - 97i$

Fijémonos en que las partes real e imaginaria pueden crecer, decrecer o cambiar de signo. Cuando el proceso de iteración prosigue, en este caso concreto, indefinidamente, los números complejos resultantes van haciéndose progresivamente mayores.

Mas, ¿qué se quiere decir, exactamente, al hablar de tamaño de un número complejo? Dado que los números complejos se corresponden con puntos del plano complejo, podemos aplicar aquí la noción de distancia. El tamaño de un número complejo, o como se le llama en matemáticas, su *módulo,* es sencillamente su distancia al número complejo 0. Tal distancia es la longitud de la hipotenusa de un triángulo rectángulo, cuyos catetos son las partes real e imaginaria del número complejo. Así pues, para hallar el tamaño, o módulo, del número, se elevan al cuadrado sus partes real e imaginaria, se suman estos cuadrados y se extrae la raíz cuadrada de esta suma. Por ejemplo, el tamaño del número complejo $7 + 4i$ es la raíz cuadrada de $7^2 + 4^2$, aproximadamente 8,062. Cuando los números complejos, merced al proceso iterativo que acabo de describir, alcanzan un cierto tamaño, crecen después muy rápidamente; tanto así, que tras unas cuantas iteraciones más, rebasan la capacidad de cualquier ordenador.

Afortunadamente, podemos despreciar todos los números que huyen chillando despavoridos hacia el infinito. El conjunto de Mandelbrot es el conjunto de todos los números complejos c para los cuales el tamaño de $z^2 + c$ permanece acotado, esto es, sus infinitas iteraciones pueden quedar todas encerradas



1. El conjunto de Mandelbrot y sus coordenadas en el plano complejo. Los recuadros pueden verse, ampliados, en la portada y en las tres páginas siguientes

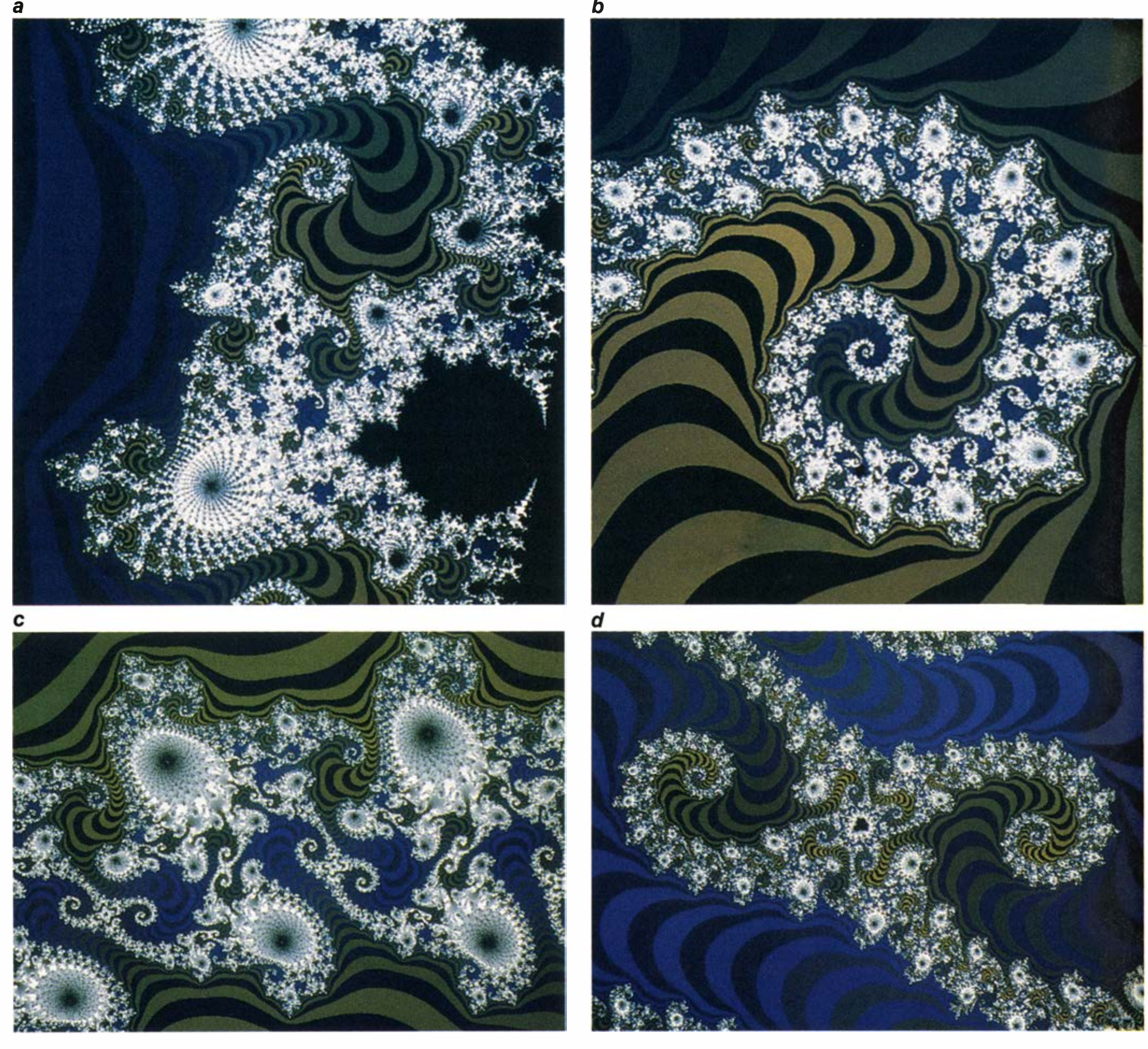
en un círculo. El programa que me dispongo a describir efectúa una búsqueda de tales números. Estoy en deuda con John H. Hubbard, matemático de la Universidad de Cornell, por todo cuanto sigue. Hubbard es una autoridad en el conjunto de Mandelbrot, y ha sido uno de los primeros en crear imágenes de él generadas por ordenador. Casi todas las que aquí se presentan fueron realizadas por Heinz Otto Peitgen y sus colaboradores, en la Universidad de Bremen. Peitgen aprendió de Hubbard este arte.

El programa de Hubbard ha inspirado un programa que yo llamo MANDELZOOM. Comienza con la preparación de una matriz y bidimensional, la llamada *imagen,* necesaria para almacenar y conservar las imágenes en ella. Los elementos de esta tabla son elementos individuales de la imagen a mostrar, llamados *píxeles,* dispuestos en formación rectangular. Hubbard utiliza una tabla de 400 filas por 400 columnas; la de Peitgen es todavía mayor. Los lectores que deseen adaptar MANDELZOOM para su uso personal, deberán definir una matriz acorde con su equipo y temperamento. Cuanto mayor sea la matriz, tanto más larga la espera, aunque también mayor la resolución y detalle de las imágenes.

En la primera parte de MANDELZOOM se puede seleccionar, a fin de examinarla, cualquier porción del plano complejo. Se especifica el ángulo inferior izquierdo del recuadro a estudiar dando el número complejo que le corresponde. Dos de las variables del programa, *avértice* y *bvértice,* permiten proporcionar, respectivamente, las partes real e imaginaria del número. La longitud de cada uno de los lados del recuadro se especifica mediante variables *lado.*

La segunda parte del programa sirve para ajustar la matriz *imagen* a fin de adaptarla al recuadro que interese; para ello se calcula el valor de una variable llamada *vano. Vano* es la distancia que, dentro del cuadrado, media entre dos píxeles adyacentes. Para calcular el valor de *vano* se divide *lado* entre el número de filas y de columnas de que conste *imagen*.

El alma del programa es su tercera parte. Se hace en ella la búsqueda de los números complejos *c* que componen el conjunto de Mandelbrot, y se asignan colores a los números que se encuentren, en un sentido especial,



2. Sucesivas ampliaciones del "recodo del pastor" situado en la región **a** *de la figura 1*

próximos. El procedimiento tiene que determinarse una vez por cada elemento de imagen, o píxel, y, por consiguiente, la matriz de 400 por 400 que utiliza Hubbard exige 160.000 cómputos independientes. Supongamos que el programa se encuentre actualmente trabajando en la fila m y la columna n. La tercera parte se descompone en cuatro pasos:

1. Calcular un número complejo c que se supone que representa al píxel: súmese $n \times vano$ al valor de *avértice*, a fin de calcular la parte real de c, que será denotada *ac*; súmese $m \times vano$ a *bvértice*, para hallar la parte imaginaria *bc* de c. No es necesario que i intervenga en el programa.

2. Asignar a una variable compleja z (cuyas partes real e imaginaria son, respectivamente, *az* y *bz*) el valor $0 + 0i$. Asignar a una variable entera llamada *recuento* el valor 0.

3. Efectuar repetidamente los tres pasos siguientes hasta que, o bien el módulo de z sea mayor que 2, o hasta que la variable recuento rebase el valor 1000; lo que antes se produzca:

$$z \leftarrow z^2 + c$$
$$recuento \leftarrow recuento + 1$$
$$módulo \leftarrow \text{módulo de } z$$

¿A qué se debe la gran importancia del número 2? Un resultado inmediato de la teoría de iteraciones de transformaciones complejas permite asegurar que las iteraciones de z divergen hacia infinito si, y solamente si, en alguna de las etapas del proceso iterativo, z llega a tener módulos mayor o igual que 2. Resulta que una elevada proporción de puntos, cuyo destino final es el infinito, rebasan ya en unas cuantas iteraciones la cota 2. Conforme aumenta la variable *recuento*, los parientes más lentos de aquéllos van haciéndose progresivamente más raros.

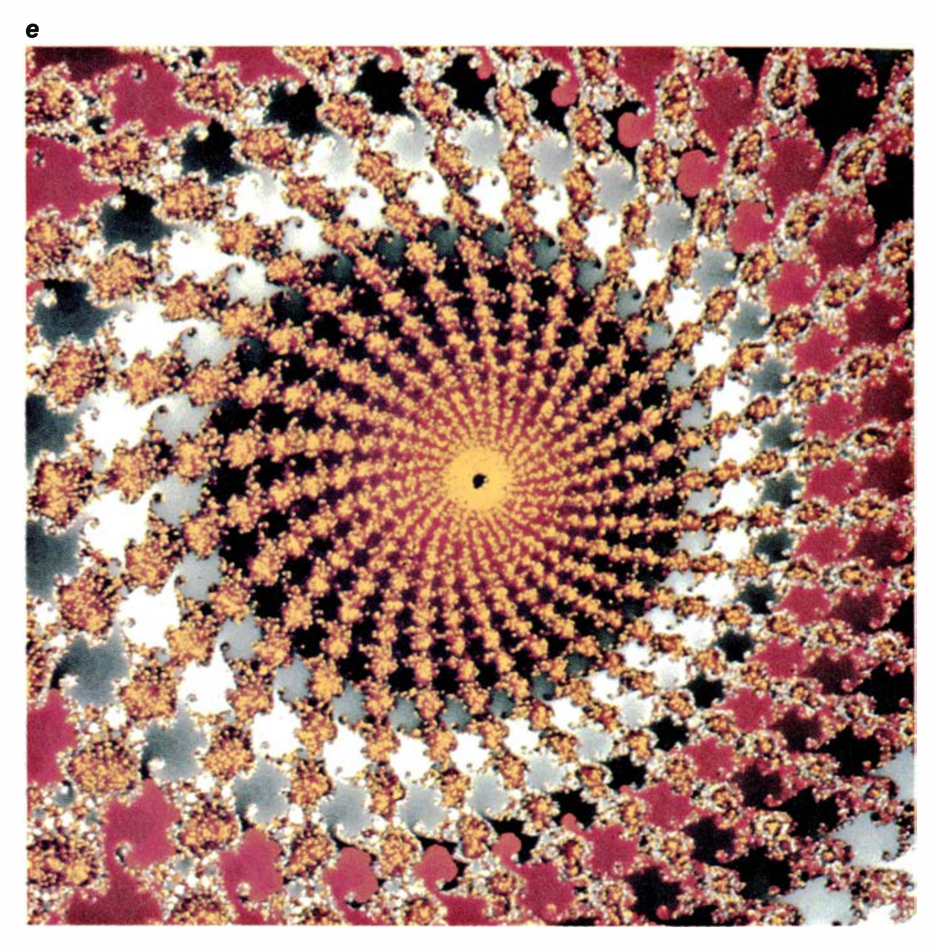
4. Asignación de un color a *imagen(m,n)*, en función del valor alcanzado por *recuento* al finalizar el paso 3. Presentación en la pantalla del píxel correspondiente. Obsérvese que el color de un píxel tan sólo es función de uno de los números de su diminuto dominio, a saber, el situado en su vértice noreste; el comportamiento de ese número representa entonces el comportamiento del píxel entero.

El plan de asignación de colores exige agrupar en subgamas el intervalo de valores que *recuento* haya alcanzado en la matriz; a cada subgama se le asigna entonces un único color. Aquellos píxeles cuyas correspondientes z rebasen la cota 2 en unas pocas iteraciones se colorearán de rojo. Aquellos otros cuyas z no lleguen al módulo 2, sino tras relativamente muchas iteraciones, se tiñen de violeta, que es el otro extremo del espectro cromático. Y los píxeles para los cuales el módulo de z se conserva inferior a 2, aun después de 1000 iteraciones, se consideran pertenecientes al conjunto de Mandelbrot, y deben colorearse de negro.

Es prudente dejar sin especificar los colores en tanto no se haya determinado el intervalo de valores que tomará *recuento* en el recuadro que se esté estudiando. Cuando ese intervalo sea estrecho, puede repartirse en él la totalidad de los colores del espectro. Así pues, Hubbard sugiere que en el paso 4 solamente se asigne a cada elemento de la matriz *imagen* el valor correspondiente de *recuento*. Un programa independiente puede encargarse después de inspeccionar la matriz, determinar los valores mínimo y máximo que en ella alcanza *recuento* y luego distribuir el espectro de colores de conformidad con los valores obtenidos. Quienes hayan llegado hasta aquí podrán, a no dudar, idear planteamientos viables.

Los lectores que carezcan de monitor de color pueden participar también, y hacerlo en blanco y negro. Aquellos números complejos para los cuales el módulo de z llegue a ser mayor que 2 antes de r iteraciones se colorean de blanco; los restantes, de negro. El valor de r puede ajustarse a voluntad. Para no esperar noches enteras los resultados del programa, la matriz puede hacerse de, pongamos por caso, 100 filas por 100 columnas. Hubbard supone que es perfectamente razonable reducir de 1000 a 100 el número máximo de iteraciones por punto. El fruto de tal programa es una sugestiva imagen puntilleada de su homóloga en color [*véase la figura 5*].

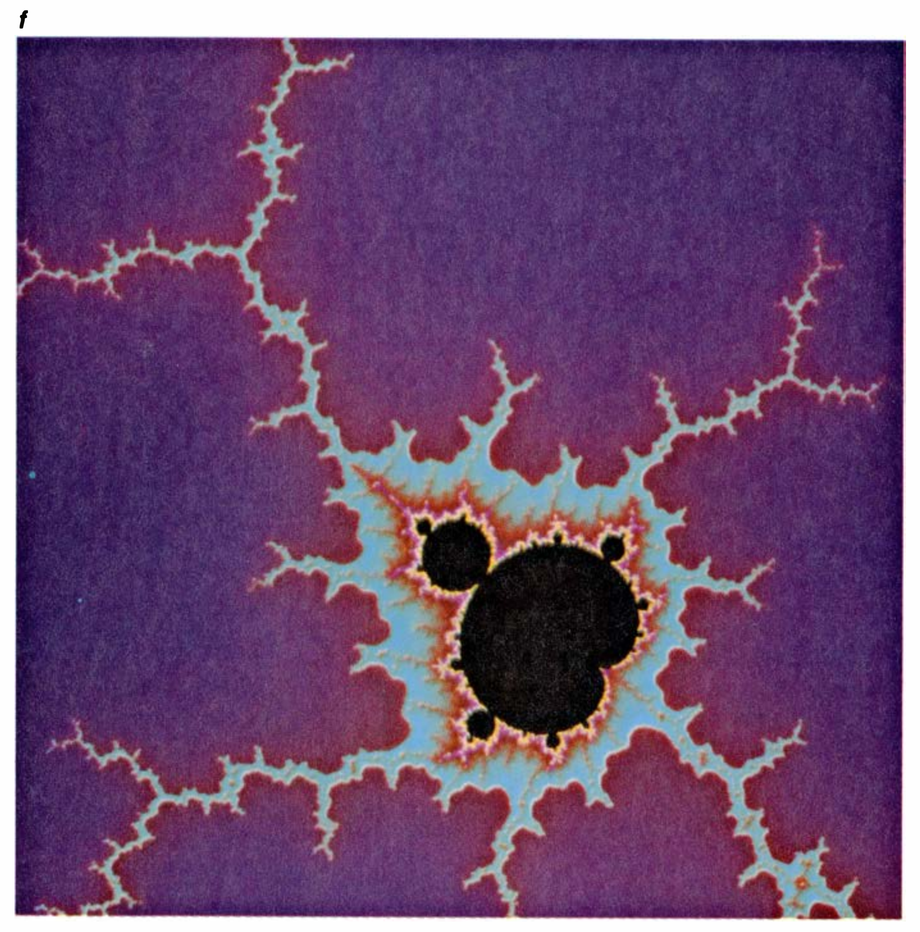
e



3. Un ojo compuesto mira curioso desde una región de la imagen **d** *de la figura 2*

¿Qué potencia de ampliación tienen las "lentes" de un ordenador personal? Depende hasta cierto punto del tamaño efectivo de los números que la máquina sea capaz de manipular. Por ejemplo, según Magi (mi amanuense de microinformática en la Universidad de Western Ontario) el IBM PC utiliza el microprocesador 8088, un microcircuito manufacturado por Intel Corporation, diseñado para manipular datos de 16 bits. Una técnica llamada "de precisión doble" permite aumentar la longitud de cada número

f



4. Un Mandelbrot miniatura, en la región **f** *de la figura 1, retenido por un filamento al conjunto principal*

hasta 32 bits. Con esta doble precisión, Magi y yo calculamos que pueden lograrse amplificaciones del orden de 30.000 aumentos. Con programación de cálculo apropiada, inspirada en la idea de ensartar en una larga ristra estos números, la precisión numérica puede ser de cientos de dígitos significativos. La amplificación del conjunto de Mandelbrot teóricamente alcanzable con tales precisiones es mucho mayor que la necesaria para resolver en partículas el núcleo atómico.

¿En qué lugares del plano complejo deberíamos efectuar nuestra exploración? En la vecindad del conjunto de Mandelbrot, claro está; pero, ¿dónde exactamente? Hubbard dice que "hay millones de preciosos lugares". Como si fuera un turista en tierras de infinitas bellezas, Hubbard bulle de sugerencias de lugares donde a los lectores puede agradarles explorar. Sus nombres no son Hawai, Hong-Kong o Bali, sino "la región comprendida entre 0,26 y 0,27 para la parte real, y entre 0 y 0,1 de parte imaginaria". Hubbard recomienda, igualmente, otros dos lugares:

Parte real	*Parte imaginaria*
de −0,76 a −0,74	de 0,01 a 0,03
de −1,26 a −1,24	de 0,01 a 0,03

El lector que examine las fotografías en color que ilustran este artículo debe tener bien presente que los puntos cuyo color no sea negro no pertenecen al conjunto de Mandelbrot. La belleza de las fotografías reside, en buena medida, en el halo de color asignado a los puntos que divergen hacia infinito. En efecto, si mirásemos aisladamente el conjunto propiamente dicho, su imagen no nos resultaría tan grata. El conjunto de Mandelbrot está todo él recubierto de largos filamentos y de versiones en miniatura de sí mismo.

En realidad, ninguna de las versiones miniaturizadas del Mandelbrot son copias exactas del conjunto paterno; tampoco hay dos de estas miniaturas que sean exactamente iguales. En las proximidades del conjunto paterno hay todavía más Mandelbrots diminutos, al parecer, flotando libremente en el plano complejo. Mas su apariencia es engañosa. Un teorema sorprendente, demostrado por Hubbard y por uno de sus colegas, Adrian Douady, de la Universidad de París, enuncia que el conjunto de Mandelbrot es conexo. Por consiguiente, incluso los diminutos Mandelbrot que parecen encontrarse en suspensión en el plano tienen que estar ligados al conjunto paterno por filamentos. Se encuentran estas miniaturas en casi toda la vecindad del conjunto paterno, y las hay de todos los tamaños. Todo cuadrado de la región contiene una infinidad de ellas; de las cuales, a lo sumo unas cuantas son visibles a una amplificación dada. Según Hubbard, el conjunto de Mandelbrot "es el más complicado objeto que existe en matemáticas".

Tras habernos enfrentado a tan infinita complejidad, siempre es reconfortante refugiarse en lo finito. La iteración de un proceso de elevación al cuadrado, efectuado sobre un conjunto finito de enteros ordinarios, engendra asimismo estructuras interesantes. Estructuras que no son ahora geométricas, sino combinatorias.

Tomemos un número cualquiera, entre 0 y 99. Elevémoslo al cuadrado y tomemos las dos últimas cifras del resultado, lo que dará también un número comprendido entre 0 y 99. Por ejemplo, 59^2 es igual a 3481; las dos últimas cifras son 81. Repitamos el procedimiento una y otra vez. Antes o después habrá de aparecer un número con el que ya nos hayamos encontrado. Por ejemplo, de 81 resulta la sucesión 61, 21, 41 y 81, y esta serie de cuatro números se repite desde entonces indefinidamente. En conjuntos finitos es inexorable que se produzcan ciclos como éste. En efecto, es fácil comprender que si en el seno de un conjunto de 100 números se efectúan más de 100 operaciones, al menos uno de los números habrá de repetirse; el primero de los números que se repita engendrará un ciclo periódico. Hay un precioso programa, que apenas requiere memoria, que permite detectar los bucles, pero de él se hablará más tarde.

Basta una hora para representar en un diagrama los resultados de este proceso de elevación al cuadrado y truncamiento. Representemos a cada uno de los números, de 0 a 99, mediante un punto dibujado en una hoja de papel. Si el proceso de elevación lleva de un número a otro distinto, se unen los correspondientes puntos mediante una flecha. Por ejemplo, habría que trazar una flecha que fuera desde el punto 59 al 81. Las primeras conexiones del diagrama pueden producir ya ciclos entremezclados; por ello, es conveniente volver a dibujarlos de cuando en cuando, procurando que no haya flechas que se crucen. Siempre es posible trazar un diagrama de las iteraciones desprovisto de cruces e intersecciones.

Se puede ir más lejos todavía. Con frecuencia surgen subdiagramas separados, que cabe mostrar de modo que

hagan resaltar algunas de las simetrías surgidas de las iteraciones. Por ejemplo, el diagrama de iteración correspondiente a los cuadrados de los enteros que van de 0 a 99 puede trazarse mediante seis subdiagramas desconectados entre sí, y que no se cortan ni enredan unos con otros. Las seis piezas aparecen por pares idénticos; cada pieza presenta gran simetría [*véase la figura 6*]. ¿Podrá el lector explicar el porqué de tal simetría? ¿Qué ocurriría si en lugar de éstos se utilizasen los enteros de 0 a 119? ¿Existe relación entre el número de piezas desconectadas de que consta el diagrama y el máximo de los enteros que componen la sucesión?

Algunos de los números complejos del conjunto de Mandelbrot obedecen a pautas de iteración similares. Para determinados valores de c, las iteraciones repetidas de la transformación $z^2 + c$ pueden producir ciclos periódicos, finitos, de números complejos. Por ejemplo, el complejo $0 + 1i$ genera una oscilación indefinida entre los los dos números complejos $-1 + 1i$ y $0 - 1i$. Puede incluso que el ciclo contenga tan sólo un número. Estos conjuntos cíclicos, ya se encuentren en un conjunto finito, ya en el conjunto infinito de Mandelbrot, se llaman atractores.

Cada una de las seis piezas del diagrama de iteración correspondiente a los enteros de 0 a 99 contiene un atractor. Geométricamente, el atractor puede representarse mediante un polígono, y los conjuntos de números que conducen a él, en forma de grafo arbóreo.

Un procedimiento para hallar atractores mediante ordenador consiste en almacenar cada uno de los números recién generados en una tabla especialmente diseñada para ello. El número recién calculado se compara con los previamente almacenados en la tabla. En cuanto se produce una coincidencia, se imprimen todos los números que figuran en la tabla, desde el punto de coincidencia en adelante, hasta el número recién engendrado. Es un método directo y fácil de programar. Pero si la tabla es grande, puede exigir tiempos muy largos. Para descubrir un ciclo atractor contenido en una tabla formada por n números hacen falta del orden de n^2 comparaciones; en efecto, puede ser necesario comparar cada uno de los nuevos números con hasta el máximo de los n números de la tabla.

Hay un sagaz programita que permite hallar atractores mucho más rápidamente. El programa no requiere n palabras de memoria, sino tan sólo dos, y puede codificarse hasta en la más sencilla de las calculadoras programables. El programa figura en un notable libro titulado *Mathematical Recreations for the Programmable Calculator,* de Dean Hoffman, de la Universidad de Auburn, y Lee Mohler, de la Universidad de Alabama. Inútil decir que muchos de los problemas tratados en el libro pueden adaptarse sin dificultad a programas de ordenador.

El programa se llama RHOP, porque la secuencia de números que acaba finalmente por repetirse cíclicamente recuerda a un trozo de cuerda (*rope,* en inglés) con un lazo o bucle (*loop*) en su extremo. Esta figura recuerda también la forma de la letra griega ρ (rho). El programa se vale de dos variables, que llamaremos *lento* y *rápido.* Al comenzar, se les atribuye a las dos variables el valor del número inicial. El ciclo iterativo del programa consta exactamente de tres instrucciones:

rápido ← *rápido* × *rápido* (mod 100)
rápido ← *rápido* × *rápido* (mod 100)
lento ← *lento* × *lento* (mod 100)

La operación mod 100 separa las dos últimas cifras de los productos. Fijémonos en que la elevación al cuadrado se efectúa por dos veces sobre el número *rápido,* pero tan sólo una sobre *lento. Rápido* se abre paso velozmente desde la cola a la cabeza de la rho a doble paso que *lento.* Ya en la cabeza, *rápido* alcanza a *lento* cuando éste ha recorrido parte de ella. El programa abandona el ciclo iterativo en cuanto *rápido* coincide con *lento.*

El atractor se detecta reiterando el proceso de elevación al cuadrado sobre el número que actualmente está asignado a *lento.* Cuando tal número se repite, se detiene la ejecución del programa y se imprime la secuencia de números que interviene desde el número hasta su repetición.

Me encantaría ver diagramas preparados por los lectores que explorasen los efectos de la elevación y truncamiento iterativos en dominios finitos de tamaño variable. Los diagramas pueden confeccionarse mediante ordenador o, también, manualmente. La iteración en dominios discretos es campo matemático recientemente roturado, con aplicaciones en informática, biomatemática, física y sociología. Los teóricos pueden esperar a que aparezca un libro sobre la materia, cuyo autor es François Robert, de la Universidad de Grenoble.

Los seres bidimensionales que pueblan el planeta Arde están agradecidos de corazón a los muchos lectores



5. Un Mandelbrot miniatura, puntilleado, generado en un monitor monocromo

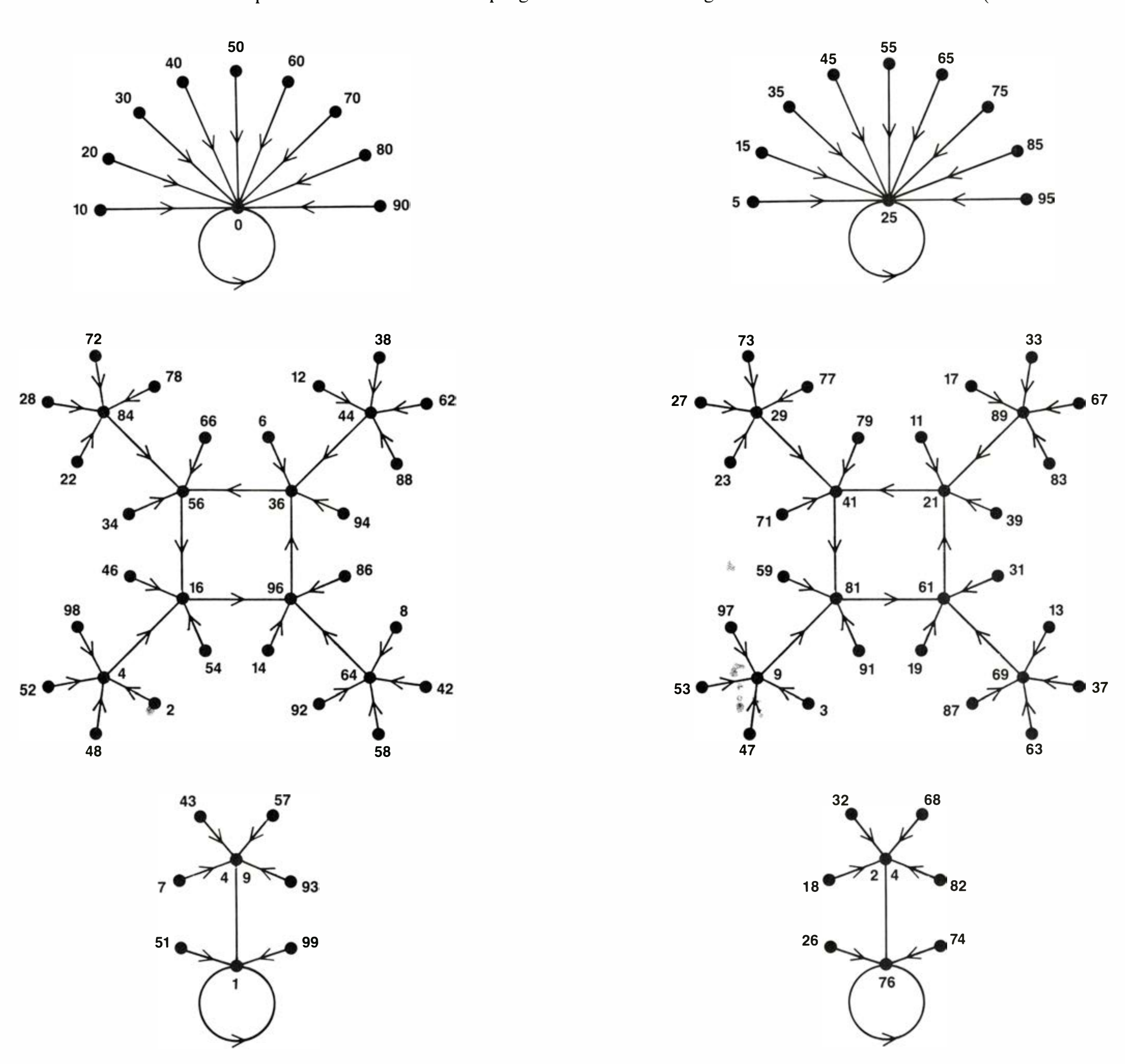
que se esforzaron en mejorar el circuito de cruce de señales, que describí en el artículo de julio. Constaba aquél de 12 puertas No-Y de dos entradas, y pedía yo a los lectores que hallasen el número mínimo de puertas No-Y (y precisamente, No-Y) necesarias para construir un tal circuito de cruce. La mayoría de los circuitos presentados redujeron el número a 10 puertas, lo que supone una cierta ventaja; tres lectores consiguieron resolver el circuito de cruce con ocho puertas [*véase la figura 7*].

En este circuito de ocho puertas, una de ellas es No-Y de triple entrada y, dos, No-Y de única entrada. Estas últimas actúan como inversoras, convirtiendo una señal 0 en una señal 1, y viceversa. Los tres lectores que dieron con la solución de ocho puertas son Eric D. Carlson, de Cambridge, Massachussetts, Dale C. Koepo, de San José, California, y Steve Sullivan, de Beaverton, Oregon. Ya he dado cuenta de sus nombres, y del circuito perfeccionado, a mis amigos ardeanos. Créase o no, ese mismo circuito de cruce se patentó el 26 de abril de 1966 en los Estados Unidos. Robert L. Frank, consultor de sistemas de Birmingham, Michigan, escribió informándome de que la patente estaba reconocida a Lester M. Spandorfer, de Cheltenham, Pennsylvania, Albert B. Tonik, de Dresher, Pennsylvania, y Shimon Even, de Cambridge, Massachusetts.

Parece lógico preguntarse si el circuito se utiliza realmente en alguno de los dispositivos de nuestros días. También es natural preguntarse si existe algún "cruzador" más pequeño con puertas No-Y. Yo supongo que no.

C. Walter Johnson, de Long Beach, California, me escribió detallándome una variedad de circuitos planares que se valen de diversos tipos de puertas. Al parecer, no sólo pueden construirse circuitos cruzadores bidimensionales sino, también, básculas, o circuitos flip-flop, planares. Las básculas proporcionarían memoria viva para un ordenador bidimensional.

Stephen Wolfram, del Institute for Advanced Research, de Princeton, ha estudiado ordenadores unidimensionales, en forma de autómatas celulares. Es demasiado pronto para decir qué pueden haber aportado los lectores a este campo, tras la aparición de la "Glider Gun Guidelines" ("Indicaciones



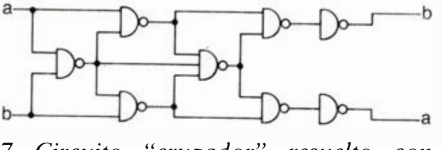
6. Las seis componentes del diagrama de iteración de la elevación al cuadrado de los 100 primeros números enteros

para un cañón lanzapatines") de Wolfram, pero puedo dar noticia de algunas reacciones iniciales. Un pecado de comisión hizo que algunos lectores se despistaran en persecución de deslizadores en el autómata que denominamos "792 ternario".

Wolfram y yo pretendíamos decir "357 ternario". Un pecado de omisión, mío esta vez, consistió en no mencionar al autómata lineal del que se sabe es capaz de computación universal. Estuve yo considerando la posibilidad de describir un tal autómata lineal, el primero de los cuales lo ideó Alvy Ray Smith, en 1970. En aquella época, Smith era estudiante de segundo ciclo de la Universidad de Stanford. Temía yo que la descripción del autómata lineal universal de Smith complicase excesivamente el artículo, pues el autómata tiene 18 estados (k = 18) y entornos tricelulares (r = 1).

Arthur L. Rubin, de Los Angeles, ha presentado una razonable sugerencia al respecto de la velocidad de la luz en autómatas lineales arbitrarios. Propone Rubin corregir un defecto de la definición hasta ahora utilizada, que establecía que la velocidad de la luz era igual a una celdilla por unidad de tiempo. La antigua definición pasa por alto la posibilidad de que haya autómatas lineales que no puedan alcanzar tales velocidades. La velocidad de la luz, en la versión corregida, es "la velocidad máxima de propagación de un impulso cualquiera (hacia la derecha, por ejemplo)". El frente de progresión del impulso está definido por la condición de que a su derecha tan sólo pueda haber ceros. A continuación, Rubin procede a demostrar que la velocidad de la luz en el autómata "792 ternario" es de un tercio.

En mi artículo de julio preguntaba yo si el autómata lineal llamado "Rizo" admitía un cañón lanzapatines unidireccional. Los patines disparados por un tal cañón habrían de propagarse indefinidamente hacia la derecha, pero nunca hacia la izquierda. William B. Lipp, de Milford, Connecticut, ha dado un sencillo y encantador razonamiento contrario a la existencia de un tal cañón. Escribe Lipp: "Imaginemos una configuración que jamás tenga valores distintos de cero situados a la izquierda de un bloque, que rotularemos 0. Fijémonos en que el valor no nulo situado en posición izquierda extrema de la configuración tiene siempre que ser un 1. Si fuera un 2, este 2 levantaría un rizo, que se propagaría indefinidamente hacia la izquierda, contradiciendo la suposición de que no hay elementos distintos de cero a la izquierda del bloque 0. Ahora, el 1 situado en izquierda extrema tiene que convertirse en un 0 en el próximo ciclo, haciendo así que el límite izquierdo de la configuración se desplace, por lo menos, un bloque hacia la derecha". Así pues, o bien un deslizador crea un rizo hacia la izquierda, o bien su cañón será devorado por ceros.



7. Circuito "cruzador" resuelto con ocho puertas **no-y**

Otros lectores buscaron demostrar que Rizo no tiene capacidad de computación universal. Para algunos autómatas puede demostrarse una condición suficiente, a saber, que el problema de detención del autómata es decidible. Rizo se detiene cuando todas sus casillas contienen ceros, pero las condiciones de detención para cualquiera de las máquinas universales que pudiera contener podrían ser muy diferentes.

Diversos lectores trataron de construir autómatas lineales provistos de capacidad de computación universal; entre ellos, Frank Adams, de East Hartford, Connecticut, Jonathan Amsterdam, de Cambridge, Massachusetts, Kiyosi Igusa, de la Universidad de Brandeis, y Carl Kadie, de East Peoria, Illinois. Todas las construcciones presentadas son directas y verosímiles, pero Kadie, no contento con su autómata unidimensional, dio un paso más, sugiriendo la posibilidad de uno cero-dimensional. Tal autómata habría de consistir en una única casilla, por lo que parece razonable llamarlo "autómata puntual". Los lectores de tendencia teórica pueden disfrutar reflexionando en la posible universalidad de un tal autómata. ¿Será ello posible?

Alvy Ray Smith publicó su demostración de existencia de un autómata lineal universal en 1971, en el *Journal of the Association of Computing Machinery*. Se pudiera pensar que una carrera inaugurada con tan prometedores auspicios estaría hoy floreciendo en alguna renombrada institución académica. Ha florecido, pero en muy otro ambiente. Smith es director de investigación de gráficos generados por ordenador de la compañía Lucasfilm, Ltd. Confío poder dar cuenta, en algún artículo futuro, de algunos de los fantásticos efectos cinemáticos producidos en el laboratorio de Lucasfilm.

Taller y laboratorio

Aspectos de la física térmica expuestos con simples útiles de cocina campestre

Jearl Walker

La cocina al aire libre puede ser una de las partes agradables de la acampada o la clave para sobrevivir en caso de apuro. Pero también nos depara algo en que pensar en torno a la física térmica: de qué modo puede transmitirse el calor desde un foco calorífico a los alimentos. Este mes vamos a examinar varios métodos para cocinar a la llama y a la brasa de carbón o con briquetas de carbón de encina. Son técnicas que necesitan muy pocos utensilios, si es que se precisan algunos.

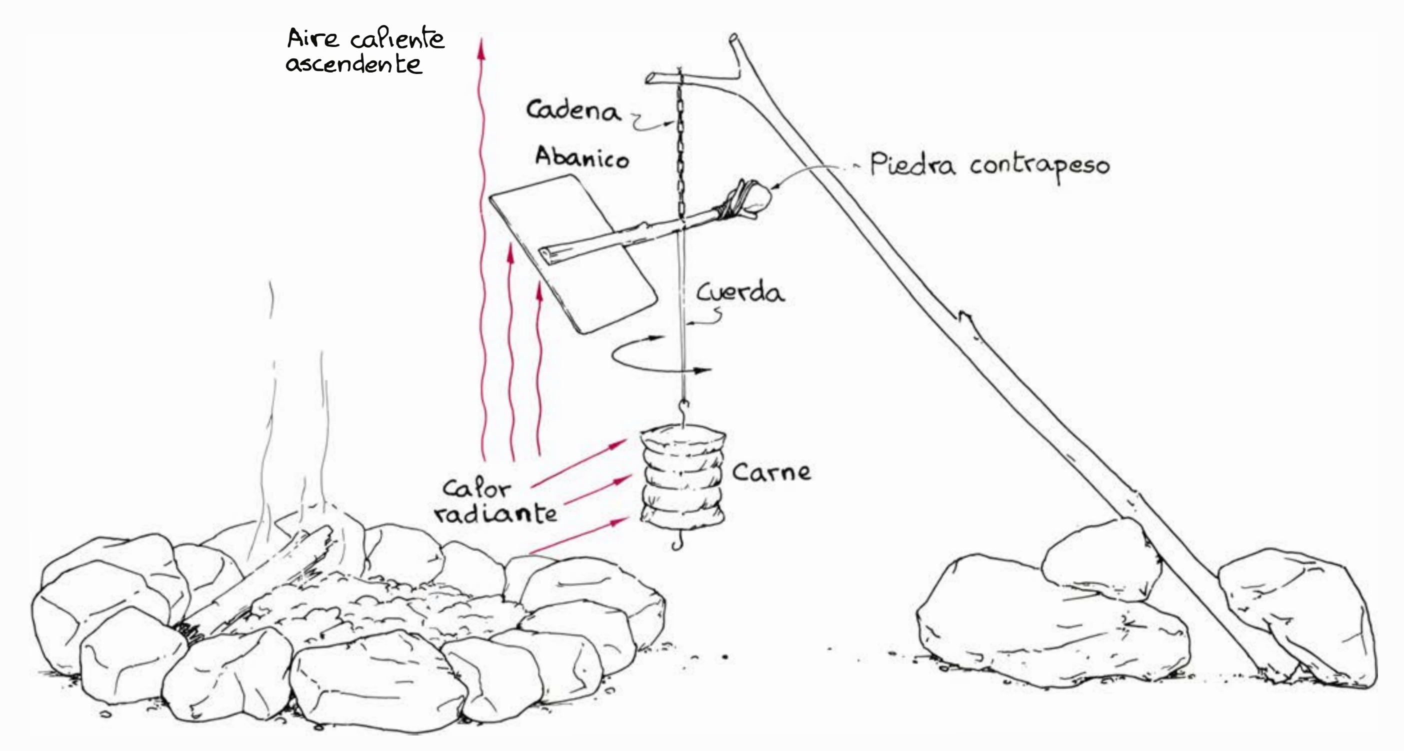
En todo procedimiento de cocina subyacen algunos conceptos básicos de física térmica. En uno de ellos interviene lo que entendemos por calor y temperatura. A cualquier temperatura por encima del cero absoluto, átomos y moléculas se mueven al azar. Si la sustancia es un sólido, ese movimiento se compone de rotación y vibración. Si es un gas o un líquido, se añade el movimiento aleatorio de átomos y moléculas al trasladarse en línea recta, para chocar entre sí y luego volver a recorrer líneas rectas.

Al calentar una sustancia, el calor representa una energía adicional que se comunica a ese movimiento al azar, o movimiento estocástico. La temperatura constituye, así, una medida de la cantidad de energía contenida en el movimiento estocástico. Entonces, cuando se calienta una sustancia, aumenta su temperatura y decimos que está más caliente. El calor incrementa la energía del movimiento estocástico de los átomos y moléculas del alimento y, con ello, éste se asa sufriendo determinados cambios químicos y físicos.

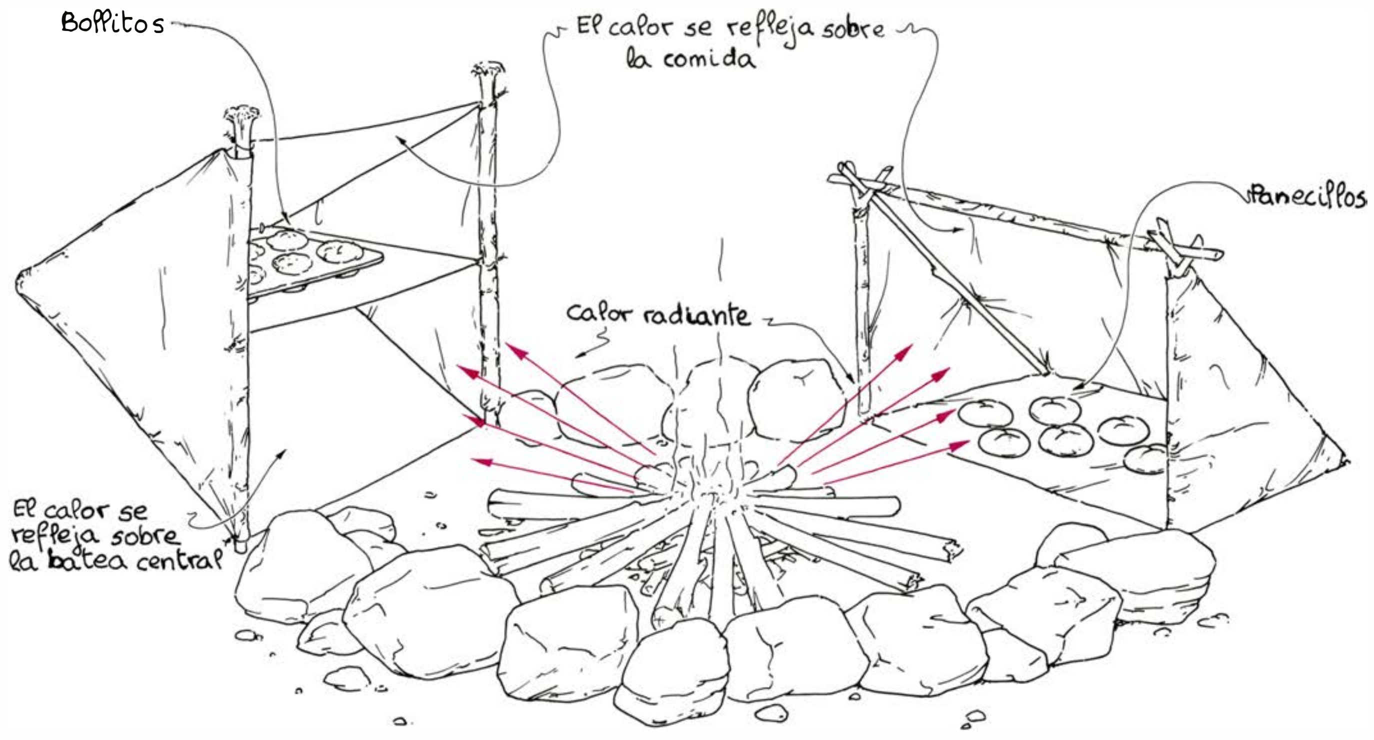
La transmisión de energía calorífica se realiza mediante tres mecanismos fundamentales: conducción, convección y radiación. En la conducción, el calor se transfiere merced a los choques atómicos, a través de algún material intermedio: una cacerola o una sartén. Conforme se caldea la superficie externa del metal, aumenta la energía del movimiento estocástico de los átomos de esa parte. Estos chocan con los átomos algo más profundos, cediéndoles parte de la energía cinética procedente del foco calorífico. La energía termina por llegar a los átomos de la superficie interior, chocan contra los del alimento y lo calientan. La conducción prosigue en tanto la temperatura del foco calorífico sea superior a la de la comida.

La convección tiene lugar gracias a la corriente ascendente de un fluido caldeado, sea éste líquido o gas. En este caso el calor aumenta la energía del movimiento estocástico del fluido y disminuye la densidad de éste. Con ello el fluido circundante, más frío y más denso, empuja hacia arriba al fluido caliente. Este pasa entonces alrededor del alimento, y sus átomos y moléculas chocan con los de la superficie del mismo, cediéndoles energía.

En el mecanismo por radiación se desarrolla la emisión y absorción de ondas electromagnéticas. Aquí el foco calorífico es, en realidad, un manantial luminoso. En efecto, la superficie de un foco calorífico, como es el carbón en combustión, emite luz dentro de las zonas infrarroja y visible del espectro electromagnético. Dado que la luz posee energía, tal emisión constituye una radiación de energía. Entonces, cuando esa luz la absorben los átomos y moléculas de la superficie del alimento, aumenta la energía del movimiento es-



1. Asador "dingle"



2. Dos montajes de horno de reflexión

tocástico de éstos, al igual que la temperatura de tal superficie. Por tanto, para calentar por radiación hace falta que la comida absorba parte de la luz (primordialmente la infrarroja) emitida por el foco calorífico.

Muchas técnicas para cocinar en fogatas se basan en más de uno de los procedimientos de transmisión de calor citados. Por ejemplo, hay fuegos que pueden calentar una cazuela metálica tanto por convección de aire caliente como por radiación luminosa. Luego, a medida que se calienta el metal, éste conduce energía hasta la comida. La superficie de ésta se calienta y, entonces, también por conducción, el calor penetra en la misma.

La manera más sencilla de asar carne y otras viandas consiste en ensartarlas en un palo o arrollarlas alrededor y, después, suspenderlas sobre el fuego o las brasas. La carne se calienta por convección de aire caliente y por radiación de las superficies calientes de las brasas y de las zonas calientes de las llamas. Podemos ahorrar esfuerzos sujetando el palo por encima del fuego o suspendiéndolo de un lado a otro de éste mediante palos ahorquillados e hincados en el suelo.

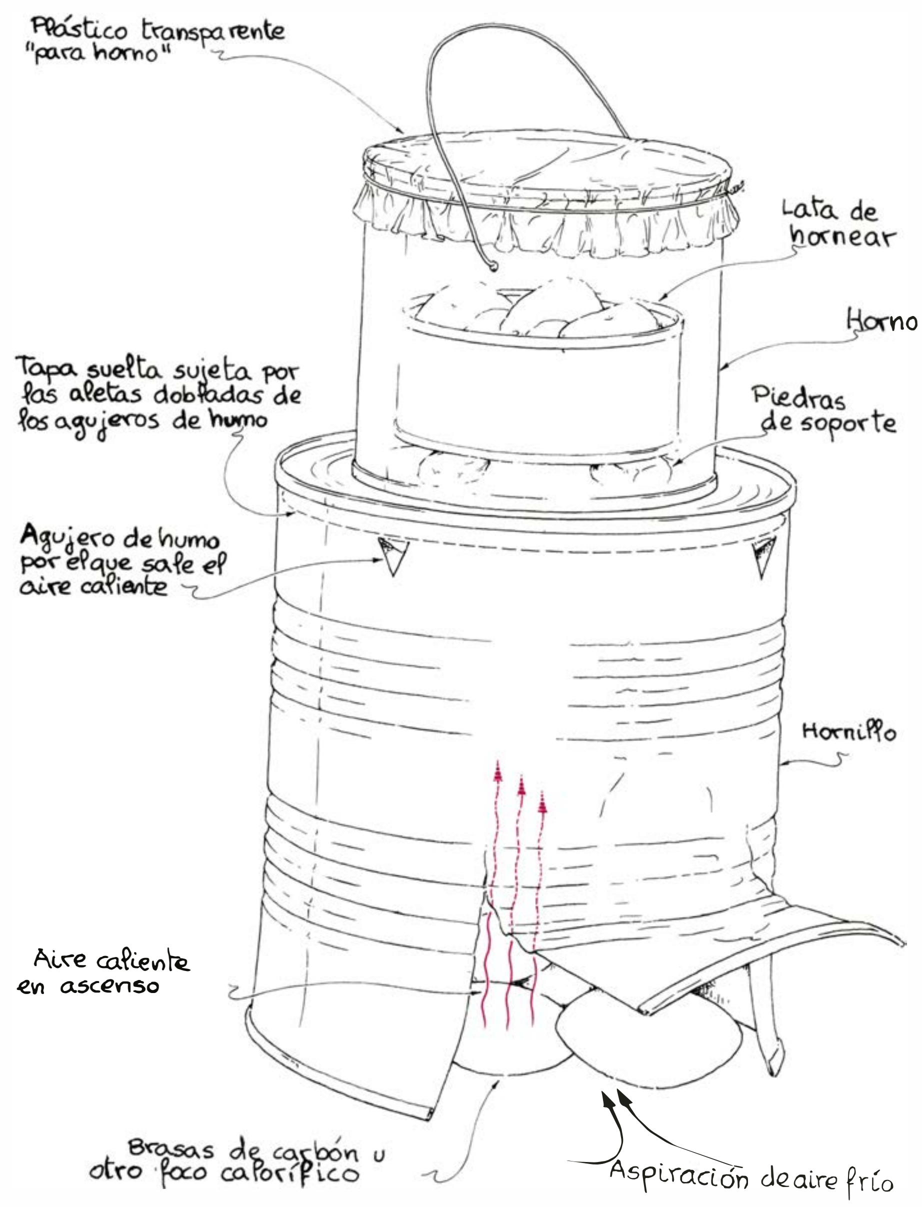
Hay que dar vueltas a la pieza de carne suspendida sobre el fuego, puesto que sólo el costado enfrentado al fuego recibe los efectos del aire caliente ascendente y la radiación. Cierto montaje, llamado *dingle* en razón, quizá, de que ciertos cobertizos madereros reciben ese nombre, facilita mucho las cosas en estos casos. Se construye sujetando una cadena corta al extremo superior de un palo inclinado y fijo en el suelo desde fuera del perímetro de la fogata. Se suspende luego la carne de la cadena mediante una cuerda provista de un gancho que se hunda en un extremo de la carne. A la cuerda se ata un palo corto. A un extremo del palo se fija un abanico hecho de alambres o ramas enrollados en papel de aluminio u hojas. Al otro extremo se sujeta una piedra pequeña para contrapesar al abanico. El plano de éste se orienta levemente desviado de la vertical y todo el conjunto se dispone de modo que el abanico se encuentre en el aire caliente que sube de la fogata. Así, la carne no se hallará en la corriente convectiva pero sí expuesta a la radiación.

El aire caliente ascendente actúa contra la cara inferior del abanico y esa fuerza lo moverá hacia un lado, retorciendo la cadena y rotando la carne. Cuando el abanico se encuentre fuera de la corriente convectiva, la cadena se recuperará y rotará la carne en sentido contrario. Pero se rebasará la posición original y la cadena volverá a retorcerse. Este ciclo se repite indefinidamente y expone a la radiación aproximadamente la mitad de la carne. Pasado un rato se invierte la pieza de asado y se cuelga de un gancho puesto en el otro extremo al objeto de exponer a la radiación la otra mitad.

Para freír puede construirse un hornillo a partir de una lata grande vacía. Quítese una de las tapas y recórtese una solapa en el extremo abierto. Esta solapa se dobla hacia fuera. La tapa suelta se introduce en la lata hasta apoyarla contra la otra tapa. Luego, con un abrelatas (de los que hacen agujeros triangulares) o una navaja, recórtense orejetas en varios puntos cercanos a la boca cerrada. Empújense esas orejetas hacia el interior de la lata de modo que sujeten la tapa suelta cerca de la boca cerrada. Colóquese entonces la boca abierta de la lata encima de un foco calorífico, con lo que podremos utilizar la tapa superior a guisa de superficie en la que freír huevos, tocino y demás.

La lata funciona cual si de una chimenea se tratara, puesto que el aire que se aspira a través de la solapa abierta en el fondo remplaza al aire caliente que se eleva hacia arriba y que sale por los orificios superiores. O sea, en el seno de la lata se organiza una intensa corriente de aire que atiza el fuego y lo mantiene vivo.

Este hornillo podría construirse sin necesidad de fijar la tapa suelta junto a la parte superior. Ahora bien, esa tapa facilita que la temperatura se mantenga casi uniforme en toda la superficie de cocción. Sin ella, la porción de dicha superficie situada en la vertical del foco calorífico estaría más caliente que el resto, ya que recibe más radiación. Su finalidad es caldear la pequeña capa de aire que tiene encima, transmitiendo



3. Horno instalado sobre un hornillo de lata



4. Mechero "buddy" con su regulador

calor a la superficie de cocción uniformemente tanto por conducción como por convección.

Sirve de foco calorífico para este hornillo el mechero "buddy", una pequeña lata llena de cartón corrugado sobre el que se ha derramado parafina caliente. Cuando se va a utilizar, la parafina está sólida. Con una cerilla se funde y vaporiza parte de la misma y ese vapor arde después. La llama consiguiente funde más parafina, que es arrastrada a la parte superior del cartón, donde se vaporiza y arde. El cartón arde también, pero despacio, como la mecha de una vela. Cubriendo parte del mechero puede colocarse un regulador que atempere el proceso si el hornillo se calienta en exceso. El regulador se hace plegando la tapa de la lata sobre un trozo de alambre doblado.

Las briquetas de carbón de encina sirven también perfectamente de foco calorífico, pero cuesta prenderlas. Una solución fácil es meterlas en una lata que haga de chimenea. Para ello se toma una lata desprovista de tapas y se le perforan orejetas junto a una de las bases. Esas orejetas se doblan hacia dentro y por ellas se introducen rollitos de periódico de suerte tal que el papel quede sujeto. La lata se coloca entonces encima de una roca, con el papel hacia abajo y de forma que quede un espacio libre entre la base y el suelo. Se introducen las briquetas en la lata y se prende el papel. Así, las llamas arrastrarán aire hacia el fondo de la lata para que remplace al que asciende a través de las briquetas hacia el exterior. Esa intensa corriente de aire hará que prendan las briquetas. Cuando se haya consumido el papel y las briquetas comiencen a caer al suelo se levanta la lata y ya tenemos nuestro fuego de cocina.

Este hornillo de lata de conservas puede convertirse en horno mediante dos latas más y algunas piedras planas. Una de las latas será mayor que la otra, pero no más ancha que la parte superior del hornillo. A la lata pequeña se le quita una de las tapas y las dos a la otra. Con plástico transparente se cubre una de las bocas abiertas de la lata grande, que se sujeta con un trozo de alambre. Con otro trozo de alambre se confecciona un asa para la primera. El plástico a utilizar es de un tipo elaborado especialmente para cocinar al horno, que no se funde a las temperaturas propias de éste.

Sobre el hornillo se depositan las piedras y, sobre éstas, la lata pequeña con el extremo abierto hacia arriba. Colocamos encima la lata grande con el plástico en la parte de arriba. Tal

conjunto es un horno donde pueden cocinarse alimentos dentro de la lata pequeña y donde el plástico hace de ventana.

Los cocineros campestres pueden elegir entre más hornos con medios elementales. Uno de ellos se consigue colocando una lata pequeña encima de varias piedras planas dispuestas en el suelo y poniendo sobre ella una lata mayor. (De ésta se quita una de las tapas, pero se deja la otra.) Sobre la tapa y en torno a los costados de la lata grande se apilan fragmentos de carbón o briquetas. Entonces, cuando esa lata se calienta, lo hace también el aire atrapado en su interior, organizándose una corriente de aire caldeado alrededor de la lata pequeña, que será donde está la comida.

Es asimismo posible cocer o rustir alimentos envolviéndolos en pan de aluminio grueso y poniéndolos directamente sobre las brasas. Puede servirnos de ayuda amontonar lodo sobre el papel. El lodo reduce algo el paso de oxígeno y hace que las brasas se quemen incompletamente, pero también retendrá el calor en tanto dure la combustión.

El inconveniente de esta técnica es que algunas porciones del alimento quizá se cuezan deprisa y se quemen. Para eliminar este riesgo, se envuelve el alimento en dos capas de pan de aluminio con varias capas de papel de periódico interpuestas. Así, el aire atrapado entre las capas, mal conductor del calor, rebaja la transmisión térmica; y, por otro lado, las bolsas de aire resultan excesivamente pequeñas para facilitar la convección.

Otro modo de proteger al papel de una transmisión de calor demasiado apresurada consiste en humedecer parte al menos del alimento. Entonces gran parte del calor se emplea en calentar y vaporizar el agua y el vapor cede calor al resto de la comida, cociéndola.

Una cáscara de naranja sirve admirablemente como recipiente donde cocer. Se rebana el tercio superior de una naranja grande. El resto de la fruta se vacía y se rellena parcialmente con la masa. La parte superior de la naranja vuelve a colocarse en su sitio y todo el conjunto se pone directamente sobre las brasas. La naranja hay que mantenerla derecha para que no se caiga la parte de arriba.

La masa se cuece merced al calor que atraviesa la cáscara de la naranja. Como la cáscara es gruesa y húmeda, no deja que el calor pase rápidamente; así queda protegida la masa contra el recalentamiento en las partes donde la naranja toca las brasas. En vez de una naranja puede emplearse una manzana o un plátano. De un modo análogo puede utilizarse una cebolla grande para cocer un huevo o pequeños trozos de carne.



5. Cómo hacer que prendan las briquetas de carbón de encina

Podemos guisar con un horno de reflexión que aproveche el calor radiado por una fogata de campamento. Este horno se construye con pan de aluminio o placas metálicas (tales como las de una lata de galletas) soportadas por palos. En la versión más simple se coloca la comida encima de un papel plano de aluminio y se dispone otro papel formando un ángulo con el primero de modo que refleje el calor hacia la comida.

Ordinariamente una de las caras del pan de aluminio es más brillante que la otra. La cara brillante de la hoja reflectora hay que colocarla hacia la comida. La hoja que sostiene la comida hay que colocarla con la cara mate hacia arriba, para que absorba parte del calor radiado y no lo pierda todo por reflexión.

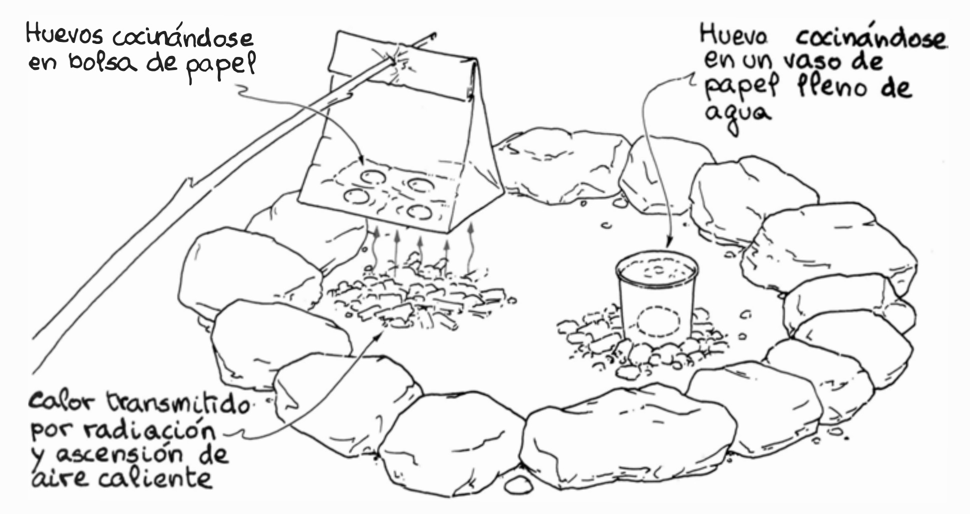
En un horno de reflexión más ambicioso se pone una segunda hoja de pan de aluminio inclinada y por debajo de la hoja horizontal: ésta recibe así calor radiante en su cara inferior. Pero aquí la lámina horizontal será una placa metálica rígida y no papel de pan de aluminio, pues éste se abarquillaría por el peso del alimento.

A partir de una lata grande a la que se haya retirado las dos tapas puede conseguirse un horno de reflexión rudimentario. La lata se coloca acostada con una de sus bocas abiertas hacia las brasas y con la comida dentro. Así las brasas irradian calor hacia el interior desde donde se refleja hacia la comida.

Si necesitamos una sartén de freír, construiremos una arrollando pan de aluminio grueso alrededor del extremo ahorquillado de un palo. Este se envuelve con una capa de pan y sobre ésta se arrollan varias capas de papel de periódico. Por último, se añade otra capa de pan de aluminio. El aire encerrado entre las capas ralentiza la transmisión de calor, proporcionando una temperatura más uniforme en la superficie de cocción.

En caso de emergencia puede servir de sartén un pedrusco plano colocado sobre las brasas. Pero hay que asegurarse de que el pedrusco no esté húmedo ni sea poroso, pues el agua que contenga puede hacerlo estallar.

Hay manuales de acampada que explican cómo cocinar un pollo entero utilizando piedras. Estas se envuelven en pan de aluminio y se ponen sobre brasas calientes. Cuando se hayan ca-



6. Dos sugerencias para cocinar huevos

lentado mucho se introducen dentro del pollo. Este se envuelve en pan de aluminio y se acomoda en un recipiente aislado con capas de papel de periódico u hojas. Así lo tendremos asado en una hora, o más, según la temperatura de las piedras. Para evitar la posibilidad de contraer *salmonella,* u otros tipos de intoxicación, se comprobará que el pollo se haya asado por completo y se consumirá al instante.

Otra técnica de cocina bastante inusitada descansa en el hecho de que el agua, en estado líquido, no puede estar a mayor temperatura que la suya de ebullición, de 100 grados Celsius. Aprovechando tal circunstancia podemos hacer un huevo duro en un vaso de papel puesto directamente en las brasas. En efecto, el papel no arderá hasta que su temperatura no llege al menos a unos 200 grados y, además, es tan fino que todo el calor que recibe lo transmite inmediatamente al agua.

Supongamos que bajo el vaso añadimos más brasas o que atizamos éstas para que se transmita calor al agua con mayor celeridad. ¿Aumentará de temperatura el agua? Respuesta: no. El calor adicional tiene por efecto aumentar la frecuencia de formación de burbujas de vapor de agua en el fondo del vaso. Además, como el agua no se calentará nunca a más de 100 grados, el papel no arderá.

Si la parte superior del vaso está seca y recibe calor suficiente, por radiación o del aire caliente ascendente, el papel se prenderá. Para hervir un huevo en un vaso de papel es muy recomendable llenarlo de agua de tal modo que ésta quede casi a ras cuando metamos el huevo. Esto es asimismo válido para hervir huevos en recipientes hechos de lona, corcho o corteza, hojas de árbol o cocos que se expongan directamente a las brasas.

Esta circunstancia relativa al agua explica otra curiosa técnica de cocina. Pártase un huevo (o más de uno) y échese en una pequeña bolsa de papel. Ciérrese ésta doblando la boca varias veces. Traspásese la parte doblada con un palo y éste dispóngase de modo que la bolsa quede suspendida sobre las brasas. Así se cocerán los huevos pues el agua que éstos contienen impedirá que el papel llegue a su punto de ignición.

Un inconveniente de esta técnica es que los huevos tienden a adherirse al papel. Mi hijo Christopher ha averiguado que la dificultad puede solventarse untando margarina o mantequilla en el interior. (Hay quienes lo resuelven cubriendo el fondo de la bolsa con bacon. Creo que debe eludirse este procedimiento. Primero, si los huevos los cocemos durante el tiempo correcto para ellos, el bacon no se habrá cocido lo suficiente. Segundo, para matar al parásito *Trichinella spiralis,* que podría estar presente en el bacon, éste debe calentarse por lo menos hasta los 65 grados, y no es tal el caso de unos trozos de bacon dentro de nuestra bolsa de papel.)

Les propongo que examinen otros sistemas de cocinar al aire libre. Los más intrigantes son aquellos que requieren únicamente elementos encontrables en la naturaleza. Podría asimismo ser interesante estudiar la reflectancia relativa a la radiación térmica de las dos caras del pan de aluminio, o bien la velocidad a la que se transmite el calor a través de sustancias tales como la piel de naranja.

Libros

Relatividad, química clínica, metalurgia, termodinámica, teoría cuántica y judíos

Luis Mas, Luis Alonso, R. L. Felip, Carlos Pérez, Juan León y Antonio Domínguez Ortíz

La Relatividad y sus Orígenes, por Banesh Hoffmann. Labor, Barcelona, 1985. Banesh Hoffmann colaboró con Einstein e Infeld en la búsqueda de soluciones a las ecuaciones de movimiento de *n* cuerpos dentro de la teoría de la relatividad general. Fruto de ese esfuerzo surgieron las ecuaciones EIH (de Einstein, Infeld, Hoffmann), que se intentan comprobar a través de las trayectorias de los satélites artificiales. En su dificultad original, y gracias a las limitaciones que impusieron a la forma de los cuerpos (simetría esférica), pudieron prescindir de la hipótesis del movimiento geodésico, de la constitución interna de los mismos y de los problemas de empalme entre el exterior y el interior de la fuente.

El libro que nos presenta Hoffmann, avivado por la narración histórica, prolonga con éxito el interés de Einstein por divulgar sus teorías de la relatividad. No pretende revolucionar la historiografía al uso, y en algunos puntos el crítico discrepa: me parece inadecuada la comparación científica entre el resultado de Galileo y el de Descartes en lo referente a la ley de inercia. Ello puede producir en la mente de un lector profano una confusión entre lo que tiene una explicación científica y lo que no.

Sólido y claro en la exposición de los fenómenos físicos, y en la selección adecuada de los mismos, el libro aprovechará a quien posea algún curso elemental de física. Insiste en los problemas de la sincronización, tan queridos por su colaborador Einstein, y conjuga prosa e ilustración. Como es sabido, el problema de la sincronización sigue planteado como lo prueba el número de artículos que merece todavía. (Véase, por ejemplo, los de H. Erlichson y R.W. Berhme en el *American Journal of Physics*, de enero de 1985.) La explicación del principio de equivalencia, extensa y adecuada, no tendría que haberse mostrado tan escueta a la hora de describir su carácter local tanto en el tiempo como en el espacio.

Puesto que se reseñan las dificultades con que tropezó la constitución de las teorías de la relatividad, bueno será hacer un balance de las dificultades con que se encuentran ahora dichas teorías, ejemplo de la inquisición sin tregua que caracteriza a la ciencia.

Cuando se aborda la relatividad especial, suelen escamotearse los problemas dinámicos. Quizá porque Einstein pretendía que el cuadro espacio-tiempo fuera suficiente para imponer la dinámica, tal como luego ocurrió con la relatividad general. Sin embargo, en relatividad especial no es así, y la segunda ley de Newton relativizada implica nuevas hipótesis y, sobre todo, una dificultad de manejo que se pone de manifiesto en el simple caso de una interacción entre dos cuerpos. En la práctica estas dificultades se solventan ciñéndose a los movimientos de partículas dentro de un campo, que no interaccionan ni entre sí ni con éste. Y así permanece abierto el problema de *n* cuerpos en relatividad especial, a pesar de haberse encontrado diversas soluciones.

Con la teoría de la relatividad general acontece casi lo contrario de lo sucedido con la relatividad especial, que fue muy controvertida en un comienzo y ahora se ha convertido en teoría clásica en sus aspectos cinemáticos. La relatividad general, debido a su gran belleza, se ganó la aceptación inicial. Pero posteriormente, cuando se intentó desarrollarla, afloraron las dificultades, técnicas sobre todo, que impiden llegar a resultados finales exactos y a veces ni siquiera aproximados. Citemos algunos ejemplos:

a) La misma belleza del principio de covariancia (las leyes físicas deben expresarse igual para todos los observadores) pone en graves aprietos el enlace entre el modelo matemático y las medidas físicas reales hechas en el laboratorio; si mis medidas no corroboran los resultados matemáticos, ¿cómo dilucidar si la teoría es mala o si estoy utilizando unos sistemas de coordenadas que no se corresponden? Piénsese sólo lo que cuesta explicar en relatividad especial la idea de espacio-tiempo en correspondencia con las medidas reales de tiempo (problema de la sincronización, ya citado y extensamente tratado en el libro).

b) Las ecuaciones de Einstein de la relatividad general, que en principio incluyen todo el universo, se pueden solucionar de modo exacto sólo en casos muy simples aunque importantes (soluciones de Scwarzschild, Kerr, etcétera); hay varias maneras de obtener soluciones aproximadas (como la de Einstein-Infeld-Hoffmann ya citada), pero el problema está muy lejos de estar cerrado para aquellos casos reales que interesan, siendo muy difícil el empalme entre soluciones interiores (zonas con fluidos, campos electromagnéticos, etcétera) con soluciones exteriores (zonas con vacío).

c) De una forma muy elegante se puede deducir de las ecuaciones de Einstein la existencia de radiación gravitatoria, semejantemente a como se deducían las radiaciones electromagnéticas de las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, para la gravitatoria todavía no se considera resuelto el problema teórico, ni se ha observado experimentalmente, si bien esto último parece inminente.

d) Uno de los capítulos donde la relatividad general nos da un cuadro teórico muy interesante es en el de cosmología. Al añadir el principio cosmológico a la relatividad general se consiguió una descripción física aceptable del universo. Ahora se está estudiando intensamente cómo introducir heterogeneidades en el cuadro demasiado homogéneo del principio cosmológico.

e) Queda, por último, el complejo problema de la gravedad cuántica, cuya solución ayudaría a interpretar los primeros instantes de nuestro universo.

La lectura del libro de Hoffmann, que recomiendo abiertamente, despierta un renovado interés por seguir de cerca las novedades que se producen en el estudio de las teorías físicas y entre las cuales las teorías de la relatividad marcan un cambio de dirección muy importante. (L.M.)

History of Clinical Chemistry, por J. Büttner (edit.); Walter de Gruyter, Berlín, 1983. Desde el primero de noviembre de 1797 hasta el 30 de junio de 1798, Francisco Carbonell Bravo dio un curso de "química general y aplicada al arte de curar". No parece que tuviera mayor trascendencia. En abril de 1842 Justus Liebig publicaba *Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Physiologie und Pathologie,* que trazaba una vía distinta de la dominante en la Alemania de la "Naturphilosophie": introducía el método cuanti-

tativo de observación en la química fisiológica y animaba a los clínicos a incorporar el análisis estadístico en el diagnóstico de la salud y la enfermedad. Si Liebig no es el padre de la química clínica, sí es el paraguas donde todos se cobijan y en quien buscan amparo. La razón del silencio en torno al químico catalán y el amplio eco que propagó la doctrina del médico de Giessen débese más que nunca al medio, pobre y raquítico entre nosotros, voluntarioso y robusto el germano.

El libro que reseñamos no es una historia *stricto sensu*, sino una compilación de distintas aportaciones en diferentes medios y circunstancias en torno a momentos fundacionales y estelares de la química clínica: Johannes Büttner, preparador de la edición, es autor de la introducción y de sendos capítulos sobre Johann Joseph von Scherer, la evolución de la enzimología clínica y las relaciones entre la medicina y la química clínicas, expresadas a través de los países germanohablantes de la segunda mitad del siglo XIX. Nikolaus Mani saca a luz los antecedentes; Joseph S. Fruton expone las relaciones entre bioquímica y química clínica; Erika Hickel recrea la aparición de la química clínica; Hans H. Simmer se centra en Erlangen, en el círculo de Eugen Franz Freiherr von Gorup-Besanez y, por último, Wendell T. Caraway enumera y comenta una breve lista de los principales útiles del laboratorio del químico clínico a lo largo de los años.

Otra limitación voluntaria de la obra es el ámbito geográfico: se ciñe a las actuales fronteras germano-austríacas con leves alusiones a la acción francesa e inglesa. El lector que busque un sumario más general y vertebrado hará bien en acudir a la reciente obra de Robert E. Kohler "From medical chemistry to biochemistry" (Cambridge University Press, 1982), que a su vez le llevará a otras fuentes más extensas o monográficas, como la de Needham o Florkin.

Pero estas lagunas con las repeticiones obligadas —no se olvide que es un compendio de artículos o conferencias escritos o dictadas sin ningún plan de publicación conjunta previo—, inexcusables en cualquier libro de historia de la ciencia, no impiden reconocer el valor intrínseco de la obra, que es el de una documentada aproximación al nacimiento de la química teórica en general y de la química clínica en particular. Rasgos suyos son también la síntesis de las distintas adquisiciones exigida por la brevedad del relato con el juicio certero y distante de la importancia contextual e histórica que va teniendo.

La química clínica se asienta sobre dos ramas: la orgánica y la analítica. Derivada aquélla de los esfuerzos del último tercio del XVIII con Scheele —quien describió numerosos ácidos orgánicos—, Ingen-Housz —quien hizo lo propio con la purificación del aire por las partes verdes de los vegetales— y Bergmann —a quien debemos la división de los cuerpos en dos clases: orgánicos e inorgánicos—. Y, sobre todo, Lavoisier, de quien parten realmente ambas ramas con su análisis de la combustión de las substancias orgánicas y el establecimiento de los nuevos cuatro elementos que componían la materia orgánica: carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. Esas bases le harían exclamar a Fourcroy en 1800: "Lo veo y estoy realmente convencido de que la química cambiará la faz de la medicina". (Carbonell Bravo sería el introductor de Fourcroy en España.) Berzelius, por último, al ahondar en la química teórica confería consistencia a sus experimentos bioquímicos.

La década del despegue de la química clínica es la de 1838-1848, cuando

distintos hospitales y facultades reclaman la figura del químico para sus análisis y guiar incluso la propia investigación médica. Así surge esa clase, míseramente pagada en la mayoría de los casos, en Berlín (1838), Würzburg (1842), Erlangen (1843), Viena (1844) y Praga (1845). El reconocimiento social para esos profesionales de segundo rango cambiaría veinte años más tarde cuando los propios clínicos se hicieron cargo de la labor ante la evidencia de que los problemas se resolvían en el laboratorio tanto como en la cátedra. En el cambio de orientación tuvo que ver el desarrollo experimentado por las distintas partes de la fisiología: procesos metabólicos, oxidación biológica, metabolismo de las proteínas, de los glúcidos y lípidos, metabolismo intermediario y la química de los coloides y enzimática, cuya sistematización, descubrimiento de metabolitos y vías intermediarias se prolongará hasta nuestro días.

En ese adelanto intervinieron muchos factores: la concentración de esfuerzos en los procesos mismos, ladeando cuestiones de tipo filosófico como el sentido holista del organismo, fuerzas vitales, principios activos y otros (cuestiones que, infelizmente, no interesaban tampoco a los filósofos, polarizados desde comienzos de siglo en el debate transformacionista); preparación de nuevos instrumentos de precisión y análisis, no limitados a lo que burlonamente se simplificaba con el alambique, el tubo de ensayo, "vista" y "olfato"; y por último, pero no lo menor, el espíritu analítico del siglo que recoge el título de los manuales tan extendidos entonces, como la traducción española de Bouchardt, "Elementos de química aplicada a las artes, a la industria y a la medicina" (Barcelona, 1843). De ese mismo *élan* participaba la junta directiva del Instituto Agrícola Catalán de San Isidro, que en 1860 creaba una cátedra "de química aplicada a la agricultura".

Con una suerte dispar en los distintos puntos de nuestra geografía, España entró en la química moderna con José Ramón de Luanco, Miguel Maisterra, Bruno Solano y, muy en particular, la "traducción" de las *Lecciones elementales de química moderna* de Adolf Wurtz por el canónigo Jaime Almera, quien "obligó" a Wurtz a abrazar la teoría unitaria: "Agotada la primera edición, publicó esta segunda en 1871, en la cual, si bien más aumentada que la primera, no se separa tampoco del método seguido por los que profesan las ideas de la teoría dualística. No sé lo que hará el Sr. Wurtz al publicar otra edición de este libro, mas parece que la fuerza de la lógica le ha de llevar a abandonar por completo el método antiguo y entregarse enteramente en brazos de las nuevas ideas.

"Anticipándome, pues, al Sr. Wurtz, llevado de la lógica y del ejemplo de los profesores de distintos países, a quienes siguen los nuestros citados, he cambiado el método del Sr. Wurtz, adoptando la exposición moderna como más lógica y racional desde el momento que se adoptan las nuevas teorías... Adopto la clasificación de los metaloides de Dumas con las modificaciones que el estado actual de la ciencia exige..." (p. VIII-IX, op. cit., Barcelona 1874). Un año antes de la tercera edición española del Wurtz de Almera, Peset y Cervera traducía al castellano un clásico de la historia química clínica del XIX alemán, el *Tratado de análisis química cuantitativa,* de C. R. Fresenius (Valencia, 1887). (L.A.)

METALURGIA GENERAL, por F.R. Morral, E. Jimeno y P. Molera. Editorial Reverté, Barcelona, 1982. De un modo asequible se nos ofrece un conjunto sistemático de conocimientos y aplicaciones de los metales que tienen significación en la técnica. El libro está dividido en diecisiete capítulos. A modo de introducción, el primero considera la metalurgia bajo tres aspectos: como arte, como ciencia y como tecnología. Se expone, en el siguiente, el origen, naturaleza y beneficio de las menas metálicas, analizando los materiales principales que intervienen en la obtención de los metales y en los tratamientos posteriores a que son sometidos con objeto de conseguir propiedades útiles.

El tercer capítulo se ocupa de los hornos, refractarios, atmósferas y medida de temperaturas. En el cuarto se explican los aspectos termodinámicos y cinéticos que intervienen en las distintas etapas de la extracción. Se detalla la aplicación termodinámica de los diagramas de Ellingham al estudio de las reacciones de formación de óxidos, sulfuros, cloruros y fluoruros metálicos que ocurren en los procesos metalúrgicos. Las reacciones principales que ocurren en los procesos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos y electrometalúrgicos constituyen el objeto del quinto capítulo. En los dos siguientes se estudia la siderurgia-metalurgia del hierro y de sus aleaciones, con atención a los hornos de prerreducidos y horno alto, además de los procesos de fabricación del acero.

Los capítulos octavo, noveno, décimo y undécimo tratan de la metalurgia de los metales no férreos, con numerosos esquemas de aparatos y diagramas de procesos. Se desentraña la obtención de metales refractarios tales como el niobio, el tántalo, el polideno, el wolframio, el circonio, el hafnio, el vanadio, lantánidos y actínidos.

A partir del capítulo duodécimo se abordan aspectos microscópicos de los metales: estructura cristalina, enlace metálico, etcétera. Como casi todas las piezas metálicas pasan por la solidificación en alguna de sus etapas de elaboración, sus propiedades finales vienen condicionadas por las variables del proceso de solidificación. Los autores explican luego los diagramas de fases binarios y ternarios, para terminar con la descripción de la naturaleza y estructura de las aleaciones. Modelo de "ciencia normal", el crítico recomendaría vivamente la obra a los alumnos y profesores de las facultades y escuelas técnicas superiores. (R.L.F.)

INTRODUCCIÓ A LA TERMODINÀMICA DE PROCESSOS BIOLÒGICS, por D. Jou, Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, 1985. Como señala certeramente el autor en la introducción del libro, llama la atención el distanciamiento que existe entre las diversas especialidades científicas. Evidentemente, a un biólogo le resulta interesante todo lo que concierne a la biofísica y a cualquier físico le parece obvia la necesidad de abordar los fenómenos biológicos desde su especialidad. Y, sin embargo, siendo esto tan claro en el plano teórico, se da en la realidad una casi total compartimentación de los estudios. Es muy extraño que un alumno de ciencias físicas haya oído mencionar procesos biológicos entre los ejemplos de clase. El biólogo, tras una asignatura de primer año —la física para biólogos—, sólo vuelve a tener contactos esporádicos con la biofísica. No es infrecuente el caso del biólogo que ignore el efecto condensador, ni el del físico que desconozca la transmisión del impulso nervioso o cómo vuela un insecto o cómo se comporta reológicamente la sangre.

La culpa de esta situación no la tienen los alumnos sino los profesores, que no siempre hacemos el esfuerzo de proponer los ejemplos más adecuados, huyendo de la compartimentación y buscando, siempre que sea posible, la conexión entre las diversas ciencias.

Esto es lo que pretende Jou entre una parte de la física, la termodinámica, y los fenómenos de la vida. Y se puede decir que la obra es un puente sólido —pasarela dice él— que sin ser puente de carga —no es un compendio ni obra de subida investigación— tien-

de un armónico paso entre los terrenos propios de la física y la biología.

El libro está planteado a un nivel que sólo un buen conocedor de estos temas puede lograr: máxima simplicidad en la formulación matemática, explica lo esencial de la termodinámica sin perderse en academicismos, busca ejemplos biológicos y la aplicación directa de los principios expuestos. Es original, accesible e interesante para un amplio público que va desde el estudiante de primer curso de ciencias hasta el investigador. Todos pueden disfrutar, perdiendo el miedo a la parte más abstracta de la física, viendo cómo las leyes de la termodinámica no sólo son compatibles con las de la biología, sino que permiten explicar muchos de sus procesos.

No se trata de un "refrito" de artículos leídos, sino de una síntesis, elemental y rigurosa a la vez, que ayuda a los físicos a ver nuevos e interesantes ejemplos termodinámicos y a los biólogos a comprender y dominar la termodinámica de los sistemas abiertos, de tanto interés en muchos campos de la biología.

El libro está escrito por alguien que, además de buen científico, aporta su buen hacer como poeta en lengua catalana. Los capítulos son ágiles y, a veces, se hacen cortos, excesivamente esquemáticos. Algunos detalles de presentación se podrían mejorar, por ejemplo los tipos para los símbolos y fórmulas científicos, la distribución de texto y fórmulas y las figuras.

Se divide en tres partes. La primera consta de tres capítulos. El primero es un somero repaso de la termodinámica del equilibrio, que da paso al segundo en el que el autor introduce los potenciales termodinámicos. El tercero, clave en esta obra, es una exposición de los principios de la termodinámica de los procesos irreversibles.

Las aplicaciones, algunas elementales, en el dominio lineal constituyen los cuatro capítulos de la segunda parte. Comienza con la difusión y la sedimentación, para pasar al transporte pasivo en membranas —la membrana, propiamente, no interviene activamente—. La termodinámica de las reacciones químicas es la base de los tres capítulos siguientes: reacciones químicas acopladas, transporte activo y fosforilación oxidativa.

El estudio quedaría incompleto sin abordar la termodinámica no lineal. Aquí el libro tiene las mismas "deficiencias" que la teoría general. En realidad esta teoría no es tan consistente, ni está tan bien fundada como la que se aplica en el dominio lineal. El carácter elemental de la obra obliga al autor a permanecer en un terreno casi cualitativo. Por eso esta parte no tiene la homogeneidad de las dos primeras. Con todo, es coherente y prefiere completar la obra, aun a costa de sacrificar parte de su brillantez. Se estudia en el capítulo IX la teoría de la estabilidad y de las bifurcaciones, y se hace referencia en los dos últimos capítulos a la ordenación de los sistemas en el tiempo y en el espacio, describiéndose algunos de los ejemplos más clásicos en este dominio: el modelo depredador-presa de Lotka-Volterra, la reacción de Belousov-Zabotinski y el problema convectivo de Bénard. (C.P.)

NON-PERTURBATIVE ASPECTS OF QUANTUM FIELD THEORY. Preparado por J. Julve y M. Ramón-Medrano, World Scientific Publishing Co., Singapur, 1982. Este libro contiene las actas del décimosegundo seminario internacional del Grupo Interuniversitario de Física Teórica (GIFT) que se celebró en San Feliu de Guíxols, en la provincia española de Gerona, durante la primera semana de junio de

1981. En esa sesión se revisaron diversas técnicas no perturbativas que permiten profundizar en el conocimiento de las teorías de gauge no abelianas, especialmente la cromodinámica cuántica (QCD), en regímenes inalcanzables utilizando los métodos perturbativos tradicionales.

P. Di Vecchia muestra en su curso sobre dinámica quiral cómo el espectro de masas de mesones seudoescalares sólo puede ser entendido correctamente tras la inclusión de la anomalía de la corriente axial singlete de sabor a través de la carga topológica de QCD. La dinámica de baja energía queda descrita mediante un lagrangiano que contiene dos ingredientes básicos: un campo, que describe a los mesones como estados ligados quark-antiquark, y la carga topológica, que describe el efecto de la anomalía axial; ahora bien, siendo la carga topológica una divergencia, la teoría de perturbaciones es incapaz de generar un término de este tipo en el langrangiano efectivo. En la última parte de su curso, Di Vecchia se ocupa de este problema y halla la solución buscada en la teoría de gauge en retículos.

J.L. Gervais explica la conexión entre QCD y la dinámica de cuerdas, tal como se deduce de las propiedades de los lazos de Wilson. Descritos dichos lazos mediante un funcional W, su dinámica queda determinada por una ecuación de evolución de segundo orden para W, ecuación cuyo desarrollo examina en el cono de luz, donde deduce la ecuación de cuerdas de Nambu y Polyakov. En este límite obtiene para las trayectorias de Regge una pendiente fijada por el punto de substracción a través de la función β de Callan-Symanzik. Tras detenerse en algunos puntos de la dinámica de SU(N), termina analizando el confinamiento y otras propiedades del campo maestro.

El libro continúa con dos cursos sobre teorías de campos de gauge en retículos (LGT). En el primero de ellos, C.P. Korthals Altes, evitando el excesivo rigor, fundamenta varios aspectos teóricos y da algunas explicaciones cualitativas de los resultados del método de Monte Carlo. Desarrolla primero los conceptos básicos de las LGT analizando el significado de los parámetros de orden, el límite de acoplo débil y la conexión entre el confinamiento y el acoplo fuerte. Compara luego las LGT no abelianas con las abelianas mucho mejor conocidas, mostrando relaciones entre los lazos de Wilson en SU(N) y Z(N). Evalúa a continuación la escala de libertad asintótica que se obtiene de los datos de Monte Carlo y mediante un cálculo de campo de fondo ("background") obtiene el valor correcto de dicha escala para el caso continuo. Aborda, por último, la física de los campos de Yang-Mills en una caja periódica y la compara con los resultados del método de Monte Carlo.

El segundo curso sobre LGT se debe a C. Rebbi. Partiendo de la observación de que se tienen métodos de aproximación excelentes tanto para valores muy grandes como muy pequeños de la función β, insiste en la utilidad del método de Monte Carlo para investigar comportamientos a valores intermedios de β. Analiza luego observables como la masa del estado excitado más bajo con números cuánticos de vacío, la temperatura de deconfinamiento y el potencial estático a pequeñas y grandes distancias. Considera también la presencia de materia acoplada a los campos de gauge, primero mediante campos bosónicos que extiende luego para incluir grados de libertad fermiónicos.

J. Zinn-Justin se ocupa en su disertación de la sumabilidad de la serie perturbativa; pone de manifiesto la relación entre los términos de la serie (en un desarrollo en el número de lazos) y la existencia y propiedades de soluciones de las ecuaciones euclídeas de campo del tipo denominado instantón. Primero analiza el comportamiento de la serie a órdenes grandes en mecánica cuántica, teoría cuántica de bosones escalares y teorías de gauge, mostrando el efecto del principio de Pauli en las teorías con fermiones. Se presentan luego métodos de sumación aplicables a los casos anteriores basados en las transformaciones de Borel y conforme, o en aproximantes diferenciales. Finalmente, se escoge el ejemplo del pozo de potencial doble para resaltar el papel de los instantones y calcular la contribución de muchos de ellos a la energía del estado fundamental en el caso de acoplo débil.

El libro finaliza con un curso sobre modelos resolubles de sistemas de espines acoplados en mecánica estadística debido a M. Rasetti. Empieza revisando el modelo de Ising para una red bidimensional, cuya función de partición se puede calcular por diferentes métodos, y muestra cómo generalizar los resultados, obtenidos mediante el método de los dímeros, a retículos de mayor dimensionalidad. (J.L.)

JUDÍOS AL SERVICIO DE PEDRO EL GRANDE DE ARAGÓN (1267-1285), POR DAVID ROMANO. Universidad de Barcelona, 1983. La historia es una ciencia social; su objeto son las colectividades, los grupos humanos. Sobre este punto hay acuerdo completo. Pero con frecuencia se olvida que esos grupos, esas multitudes se componen de familias concretas y de personas singulares, y que el historiador que no profundiza hasta esas células elementales corre el riesgo de perderse en abstracciones, de no tomar contacto con la realidad concreta. Riesgo, por cierto muy frecuente y origen de malentendidos y disputas bizantinas.

Estas consideraciones me vienen a la mente al leer el antes citado libro de David Romano. El profesor Romano, por una de esas anomalías nada infrecuentes en la universidad española, es titular de una cátedra de filología románica, pero su vocación principal y el objeto de sus investigaciones es el judaísmo peninsular, en especial el estudio de los judíos de la antigua Corona de Aragón durante la Edad Media. Es éste, como todos los suyos, un trabajo sólidamente documentado, fruto de largas investigaciones, en especial en ese magnífico depósito documental, enclavado en uno de los más sugerentes parajes del casco antiguo de Barcelona que es el Archivo de la Corona de Aragón. El libro se estructura en dos partes: la primera abarca los años 1276-1283, es decir, la mayor parte del reinado de Pedro III (II de Cataluña) y la segunda los dos últimos años de aquel reinado. El motivo de esta división es que en octubre de 1283 el rey, acosado por el papa Martín IV, que llegó a excomulgarle, y por el rey de Francia, a causa de sus pretensiones a la isla de Sicilia, tuvo que transigir con las demandas de sus vasallos y conceder a los aragoneses el *Privilegio General,* que, entre otras cosas, limitaba la actuación de los judíos, tan influyentes hasta entonces en la administración real aragonesa.

Fue aquel siglo XIII quizás el siglo oro de la judería hispana; nunca fueron tan influyentes, nunca fueron tan aceptados nuestros hebreos, precisamente cuando en otros países de Europa eran objeto de sañuda persecución. Pero no hay que exagerar el clima de convivencia religiosa que en España se vivía; el recelo mutuo subsistía, y a las motivaciones religiosas se mezclaban otras de tipo socioeconómico; la presión victoriosa que las clases altas y medias catalanoaragonesas ejercieron sobre el rey Pedro para eliminar a los judíos de los altos cargos administrativos es una prueba de ello. El rey se comprometió a no confiarles los cargos de *bailes* (palabra de la que deriva la actual *batlle,*

alcalde). Incidentalmente debo apuntar que hubiera sido oportuno, teniendo en cuenta que el libro no se dirige sólo a especialistas, que D. Romano hubiera explicado el alcance de dicho término. No es fácil de hacer en pocas palabras, porque el baile o bayle era un representante real, unas veces a nivel local, otras comarcal o regional, con múltiples atribuciones, incluyendo las económicas y las judiciales. Más que al gobernador o al alcalde de nuestros días se parecía al corregidor castellano del Antiguo Régimen.

Que un cargo de tal importancia lo ostentaran hebreos dice mucho de la confianza que los reyes depositaban en ellos; explica también los enconos y rivalidades que suscitaban, plasmados en la aludida prohibición, que Pedro el Grande trató de eludir en algunos casos suprimiendo el nombre y manteniendo la función. Pero es evidente que 1283 es un primer hito en el declinar, luego acelerado, de la influencia hebraica en España. No hay tampoco que tomar ésta en un sentido demasiado amplio ni identificar al judío medieval con el cortesano influyente, el financiero, el usurero implacable. Lo fue en determinados casos, que explican los odios que contra él se acumularon. Pero la mayoría de los habitantes de las juderías eran modestos artesanos y pequeños comerciantes que ganaban penosamente su vida.

El carácter muy minoritario de la alta burguesía hebrea queda bien reflejado en las páginas de este libro. Las familias que por él desfilan pertenecen básicamente a tres familias: los Muza de Portella, originarios de Tarazona, los Abenafia, de Calatayud, y los Alcostantiní, también aragoneses, aunque con fuertes intereses en el reino de Valencia. Otros nombres desfilan, de menor relevancia, y en todos los casos se comprueba la solidez de los vínculos familiares, los cuales, unidos a la comunidad de religión y de intereses, constituían la fortaleza y a la vez la debilidad de aquella minoría. La fortaleza dimanaba de su competencia profesional y de su fuerte cohesión. La debilidad, de ese mismo enquistamiento que le hacía ser mirada desde el exterior como un cuerpo extraño.

Y volvemos a nuestras palabras iniciales; descendiendo hasta el nivel familiar e idividual, utilizando un aparato documental extraordinario, el profesor Romano nos sitúa muy lejos de las inconcretas y con frecuencia engañosas generalidades sobre los judíos y nos introduce en la intimidad de sus existencias individuales, de sus éxitos y fracasos, porque también los tuvieron, y algunos sonados. La protección de los reyes era interesada, se basaba en la competencia administrativa y la habilidad recaudatoria de los judíos; un negocio que tenía quiebras; ejemplo, el fracaso final del poderoso Mosé Alcostantiní, baile de Zaragoza y de Valencia, que intentó arrendar las rentas reales de ambos reinos y al fin se vio sujeto a un proceso que por poco le cuesta la vida.

Este libro es el complemento y síntesis de las numerosas aportaciones que David Romano lleva realizadas a este tema. Proporciona una visión global asequible, objetiva y aséptica acerca de una cuestión que conlleva cierta carga polémica. Esa objetividad no es el menor de los méritos de esta obra. Se complementa con un apéndice documental y un índice onomástico que facilita su consulta. Hubiera sido deseable también un léxico de voces que para el lector corriente no son familiares, y tampoco hubiera sido superfluo indicar, aunque fuera de forma muy aproximada, la equivalencia en poder adquisitivo actual de los *sueldos* y otras monedas coetáneas. (A.D.O.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

PROTUBERANCIAS SOLARES

EINE THEORIE DER SOLAREN FILAMENTE. R. Kippenhahn, A. Schluter en *Zeitschrift fur Astrophysik,* vol. 43, págs. 36-62; 1957.

SOLAR PROMINENCES. E. Tandberg-Hanssen. D. Reidel; 1974.

THE SUPPORT OF PROMINENCES FORMED IN NEUTRAL SHEETS. M. Kuperus y M. Raadu en *Astronomy and Astrophysics,* vol. 31, págs. 189-193; 1974.

PHYSICS OF SOLAR PROMINENCES. Dirigido por E. Jensen, P. Maltby y F.Q. Orrall. IAU *Coll,* n.º 44. Oslo, 1979.

SOLAR MAGNETOHYDRODYNAMICS. E. Priest. D. Reidel; 1983.

CURRENT SHEET MODELS FOR SOLAR PROMINENCES. J.M. Malherbe y E.R. Priest en *Astronomy and Astrophysics,* vol. 123, págs. 80-88 y vol. 127, págs. 153-160; 1983.

LA CELULA SUPRARRRENAL CROMAFIN

THE ADRENAL MEDULLA. Stephen W. Carmichael. Eden Press, 1979-84.

THE MOLECULAR ORGANIZATION OF ADRENAL CHROMAFFIN GRANULES. Hans Winkler y Edward Westhead en *Neuroscience,* vol. 5, n.º 11, págs. 1803-1823; noviembre, 1980.

THE CHROMAFFIN GRANULE. H. Winkler y S. W. Carmichael en *The Secretory Granule,* dirigido por A. M. Poisner y J. M. Trifaró. Elsevier Biomedical Press, 1982.

CALCIUM CONTROLS EXOCYTOSIS IN BOVINE ADRENAL MEDULLARY CELLS. Peter Baker y Derek Knight en *Trends in Neuroscience,* vol. 7, n.º 4, págs. 120-126; abril, 1984.

EL MICROSCOPIO DE EFECTO TUNEL

ENERGY GAP IN SUPERCONDUCTORS MEASURED BY ELECTRON TUNNELING. Ivar Giaever en *Physical Review Letters,* vol. 5, n.º 4, págs. 147-148; 15 de agosto de 1960.

(111) FACETS AS THE ORIGIN OF RECONSTRUCTED AU(110) SURFACES. G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber y E. Weibel en *Surface Science,* vol. 131, n.º 1, págs. L379-384; agosto, 1983.

REAL-SPACE OBSERVATION OF 2 × 1 STRUCTURE OF CHEMISORBED OXYGEN ON NI(110) BY SCANNING TUNNELING MICROSCOPY. A. M. Baró, G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Stoll, A. Baratoff y F. Salvan en *Physical Review Letters,* vol. 52, n.º 15, págs. 1304-1307; 9 de abril de 1984.

EL VACIO CLASICO

A BRIEF SURVEY OF STOCHASTIC ELECTRODYNAMICS. T. H. Boyer en *Foundations of Radiation Theory and Quantum Electrodynamics,* dirigido por A. O. Barut. Plenum, 1980.

QUANTUM FIELD THEORY, HORIZONS, AND THERMODYNAMICS. D. W. Sciama, P. Candelas y D. Deustch en *Advances in Physics,* vol. 30, n.º 3, págs. 327-366; mayo-junio, 1981.

DERIVATION OF THE BLACKBODY RADIATION SPECTRUM FROM THE EQUIVALENCE PRINCIPLE IN CLASSICAL PHYSICS WITH CLASSICAL ELECTROMAGNETIC ZERO-POINT RADIATION. T. H. Boyer en *Physical Review D,* vol. 29, n.º 6, págs. 1096-1098; 15 de marzo de 1984.

LOS VERTEBRADOS MESOZOICOS DE TAILANDIA

CYCLOTOSAURUS ascf. *POSTHUMUS* FRAAS (CAPITOSAURIDAE, STEREOSPONDYLI) FROM THE HUAI HIN LAT FORMATION (UPPER TRIASSIC), NORTHEASTERN THAILAND, WITH A NOTE ON CAPITOSAURID BIOGEOGRAPHY. Rucha Ingavat y Philippe Janvier en *Géobios,* volumen 14, n.º 6, páginas 711-725; 1981.

PALEOGEOGRAPHIC HISTORY OF WESTERN THAILAND AND ADJACENT PARTS OF SOUTH-EAST ASIA: A PLATE TECTONICS INTERPRETATION. Sangad Bunopas. Publicación n.º 5 del Servicio Geológico de Tailandia, Departamento de Recursos Minerales, Bangkok, Tailandia; 1982.

TRIASSIC TURTLE REMAINS FROM NORTHEASTERN THAILAND. France de Broin, Rucha Ingavat, Philippe Janvier y Nares Sattayarak en *Journal of Vertebrate Paleontology,* vol. 2, n.º 1, págs. 41-46; mayo 1982.

GONIOPHOLIS PHUWIANGENSIS NOV. SP., A NEW MESOSUCHIAN CROCODILE FROM THE MESOZOIC OF NORTHEASTERN THAILAND. Eric Buffetaut y Rucha Ingavat en *Géobios,* vol. 16, n.º 1, págs. 79-91; 1983.

THE PERMO-TRIASSIC "PALEOTETHYS" IN MAINLAND SOUTHEAST ASIA AND ADJACENT PARTS OF CHINA. D. Helmcke en *Geologische Rundschau,* vol. 74, págs. 215-228; 1985.

RESTOS JOVENES DE SUPERNOVA

TYCHO BRAHE, A PICTURE OF SCIENTIFIC LIFE AND WORK IN THE SIXTEENTH CENTURY. J. L. E. Dreyer. A. & C. Black; Edinburgh, 1890.

THE HISTORICAL SUPERNOVAE. David H. Clark y F. Richard Stephenson. Pergamon Press, 1977.

SUPERNOVA REMNANTS AND THEIR X-RAY EMISSION. Dirigido por John Danziger y Paul Gorenstein. D. Reidel Publishing Co., 1983.

EL HIELO ANTARTICO

ANTARTIC SNOW AND ICE STUDIES 2. Dirigido por A. P. Crary, Antarctic Research Series Vol. 16, American Geophysical Union, 1971.

FROZEN FUTURE: A PROPHETIC REPORT FROM ANTARCTICA. Dirigido por Richard S. Lewis y Philip M. Smith. Quadrangle Books, 1973.

THE CLIMATIC RECORD IN POLAR ICE SHEETS. Dirigido por Gordon de Q. Robin. Cambridge University Press, 1983.

INGENERIA DE LA MARIPOSA

MECHANICAL DETERMINANTS OF NECTAR FEEDING STRATEGY IN HUMMINGBIRDS: ENERGETICS, TONGUE MORPHOLOGY, AND LICKING BEHAVIOR. J. G. Kingsolver y T. L. Daniel en *Oecologia,* volumen 60, páginas 214-226; 1983.

THERMOREGULATION AND FLIGHT IN *COLIAS* BUTTERFLIES: ELEVATIONAL PATTERNS AND MECHANISTIC LIMITATIONS. J. G. Kingsolver en *Ecology,* vol. 64, págs. 534-545; 1983.

THE AERODYNAMICS OF HOVERING INSECT FLIGHT. C. P. Ellington en *Philosophical Transactions of the Royal Society, B. Biological Sciences,* vol. 305, n.º 1122, págs. 1-181; 22 de febrero de 1984.

JUEGOS DE ORDENADOR

MATHEMATICAL RECREATIONS FOR THE PROGRAMMABLE CALCULATOR. Dean Hoffman y Lee Mohler. Hayden Book Co., 1982.

THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE. Benoit B. Mandelbrot. W. H. Freeman and Company, 1983.

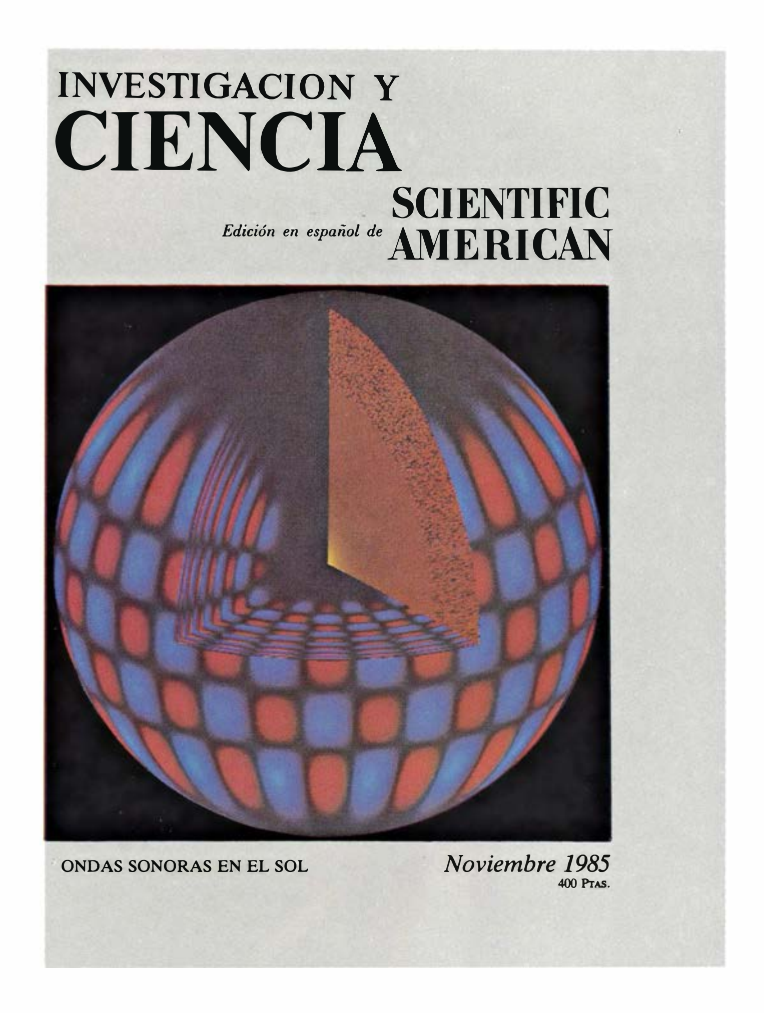
DISCRETE ITERATIONS. François Robert; traducido del francés por Jon Rokne. Springer-Verlag. En prensa.

TALLER Y LABORATORIO

BOY SCOUT FIELDBOOK. Boy Scouts of America. Workman Publishing Company, 1978.

THE U.S. ARMED FORCES SURVIVAL MANUAL. Dirigido por John Boswell. Rawson, Wade Publishers, Inc., 1980.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



SUSPENSION DE LA PRODUCCION DE MATERIAL FISIBLE PARA ARMAMENTO, por Frank von Hippel, David H. Albright y Barbara G. Levi
Un alto en la producción de los componentes esenciales para las armas nucleares resultaría muy fácil de verificar. Contribuiría a un control más estrecho de los arsenales de las superpotencias.

HELIOSISMOLOGIA, por John W. Leibacher, Robert W. Noyes, Juri Toomre y Roger K. Ulrich
Ondas acústicas del interior del Sol se manifiestan en su superficie en forma de oscilaciones. Su configuración y período informan de la estructura, dinámica y composición solares.

OLIGOSACARINAS, por Peter Albersheim y Alan G. Darvill
Se han descubierto moléculas reguladoras en fragmentos de la pared celular vegetal. Intervienen en el crecimiento, desarrollo, reproducción y defensa contra las enfermedades.

ORGANIZACION COMPARTIMENTADA DEL APARATO DE GOLGI, por James E. Rothman
Este orgánulo celular modifica las proteínas, las ordena y las empaqueta para su distribución. Se ha comprobado la presencia en él de tres sectores, especializados en modificaciones distintas.

CATALIZADORES BIMETALICOS, por John H. Sinfelt
Se controla la velocidad de las reacciones variando la composición de minúsculos cúmulos de átomos metálicos, que ya se emplean en el refinado del petróleo.

UNA ARAÑA SALTADORA Y TEJEDORA, por Robert R. Jackson
A diferencia de la mayoría de las arañas saltadoras, la especie australiana Portia fimbriata *teje también redes.*

LAPSUS LINGUAE, por Michael T. Motley
Permiten vislumbrar el proceso que subyace a una de las conductas más complejas: el habla.

COMPORTAMIENTO CROMOSOMICO, por Juan-Ramón Lacadena
El comportamiento de los cromosomas debe asegurar el cumplimiento de sus tres funciones fundamentales: conservar, transmitir y expresar la información genética que contienen.

